

## MB 2025-09

Cartographie à l'aide du XRF portatif des faciès de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean associés à des minéralisations en Ni-Cu-Co, Province de Grenville centrale, Québec

**Documents complémentaires**

*Additional Files*



**Licence**



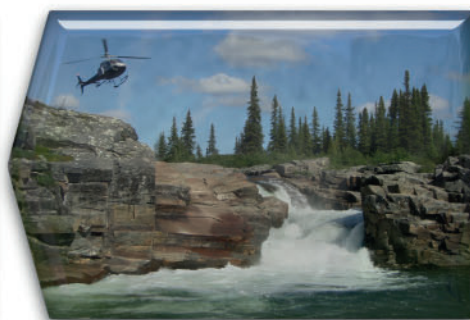
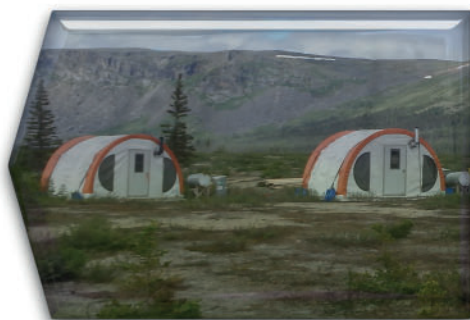
*License*

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 à l'aide du XRF portatif des faciès de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean associés à des minéralisations en Ni-Cu-Co, Province de Grenville**

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

MB 2025-09

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 préliminaire sur l'avancement des travaux**

**Cartographie à l'aide du XRF portatif des faciès de la marge  
nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean associés à  
des minéralisations en Ni-Cu-Co, Province de Grenville  
centrale, Québec**

**Par**

Othman Bounour<sup>1</sup>, Sarah Dare<sup>1</sup>, Renée-Luce Simard<sup>1</sup> et Abdelali Moukhsil<sup>2</sup>

1 : Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

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

28 avril 2025



## Résumé

Cette étude porte sur la cartographie détaillée et la caractérisation pétro-géochimique des faciès anorthositiques et des minéralisations associées de la marge Nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ), dans la région du Lac à Paul, dans les environs des indices en Ni-Cu de Léo-Charl, Nourricier et MHY. Elle vise également à déterminer la calcicité du plagioclase des roches et sa distribution spatiale à l'échelle du secteur.

La cartographie a mis en évidence une prédominance de (leuco)norite, de (leuco)gabbronorite et de roches du même type enrichies en oxydes et en apatite, accompagnées en moindres quantités d'anorthosite, de leucotroctolite (associée à des variétés riches en oxydes et en apatite) et de webstérite pour le secteur central. À l'est, le Gabbro de Steve est formé essentiellement de (leuco)gabbronorite à grain fin contenant des enclaves de leuconorite et d'orthogneiss. Au nord-ouest, la norite est localement recoupée par un dyke d'orthopyroxénite porteur de la minéralisation en Ni-Cu de l'indice de Léo-Charl. Au nord, les faciès anorthositiques sont en contact faillé avec les gneiss du Complexe de Rouvray qui se composent principalement de gneiss rubanés granodioritiques, tonalitiques et charnockitiques.

Plusieurs lithologies anorthositiques sont aussi riches en apatite (1 à 20 %) et en oxydes de fer (1 à 25 %), avec une prédominance marquée de l'ilménite par rapport à la magnétite, ce qui suggère une cristallisation à partir d'un magma anorthositique évolué. Cela est confirmé par les données sur la composition du plagioclase obtenues par XRF portatif qui indiquent une composition évoluée (andésine,  $An_{38}$  à  $An_{51}$ ), ainsi que par les teneurs en  $P_2O_5$  élevées ( $> 0,03$  % poids) dans ces lithologies par rapport à celles des autres marges de la SALSJ. Ces lithologies ne contiennent que des traces de sulfures.

À Léo-Charl, la minéralisation en Ni-Cu, dominée par la pyrrhotite et localement enrichie en chalcopryrite, pyrite et pentlandite, est associée à un dyke d'orthopyroxénite qui recoupe localement la norite. Les études à venir sur les carottes de forage permettront de mieux définir les mécanismes responsables de la mise en place des autres indices de Ni-Cu du secteur.

## Table de matières

Résumé.....	2
Table de matières .....	3
Liste des figures .....	4
1. Introduction.....	6
2. Méthodologie .....	6
3. Contexte géologique général.....	7
4. La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) .....	8
4.1. Minéralisations Ni-Cu des marges ouest et sud de la SALSJ .....	11
4.2. Géologie locale du secteur de Lac à Paul .....	12
4.2.1. Minéralisations Ni-Cu de la marge nord de la SALSJ.....	15
5. Observations de terrain 2024 .....	17
5.1. Gneiss du Complexe de Rouvray.....	20
5.1.1. L'unité mProu1 .....	20
5.1.2. L'unité mProu2 .....	21
5.2. La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) .....	23
5.2.1. (Leuco)norite et (leuco)gabbro-norite .....	23
5.2.2. (Leuco)troctolite .....	28
5.2.3. Anorthosite.....	30
5.2.4. Websterite.....	32
5.2.5. Orthopyroxénite (dyke).....	34
5.2.6. (Gabbro)norite nelsonitique .....	35
5.2.7. (Leuco)gabbro-norite de Steve (gabbro de Steve) .....	38
5.2.8. Unités tardives .....	41
5.2.8.1. Granite à feldspath alcalin .....	41
5.2.9. Minéralisation Ni-Cu de l'indice de Léo-Charl .....	41
6. Déformation des unités du secteur d'étude.....	47
6.1. Le litage Primaire.....	49
6.2. La Foliation et linéation .....	49
7. La calcicité par fluorescence X portative (XRFp) .....	51
7.1. Méthode d'analyse .....	51

7.2.	Distribution spatiale de la composition de plagioclase.....	53
8.	Lithogéochimie de roche totale.....	57
8.1.	Méthodes analytiques.....	57
8.2.	Les oxydes majeurs.....	57
8.3.	Éléments traces .....	61
8.3.1.	Le spectre des éléments de terres rares (ETR) et multi-éléments.....	61
8.3.2.	Éléments chalcophiles.....	68
9.	Discussion et conclusion.....	71
	Références.....	73

### Liste des figures

Figure 1 :	Carte géologique de la Province de Grenville montrant les occurrences des suites anorthositiques, dont celle de Lac-Saint-Jean (LSJ).....	8
Figure 2 :	Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean avec les indices de minéralisation de sulfures (Ni-Cu) et oxydes (Fe-Ti-V-P).....	10
Figure 3 :	Carte géologique sur fond géophysique de secteur de Lac à Paul montrant les différentes unités de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, indices Ni-Cu et Fe-Ti-P-V .....	14
Figure 4:	Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude avec l'emplacement des échantillons, et indices Ni-Cu et Fe-Ti-P-V .....	19
Figure 5 :	Photographies des gneiss de l'unité mProu1 du Complexe de Rouvray. ....	21
Figure 6 :	Photographies des gneiss de l'unité mProu2 du Complexe de Rouvray. ....	23
Figure 7 :	Photographies de leuco/(gabbro)norite de secteur d'étude. ....	26
Figure 8 :	Microphotographies de leuco(gabbro)norite de secteur d'étude. ....	27
Figure 9 :	Photographies de (leuco)troctolite du secteur d'étude.. ....	29
Figure 10 :	Microphotographies de la (leuco)troctolite du secteur d'étude.....	30
Figure 11 :	Photographies de l'anorthosite massive grossièrement grenue de secteur d'étude.....	32
Figure 12 :	Photographies de la webstérite de secteur d'étude. ....	33
Figure 13 :	Photographies du dyke d'orthopyroxénite dans le secteur de Léo-Charl.....	35

Figure 14: Photographies de (gabbro)nelsonitique nelsonitique. ....	37
Figure 15: Photographies de la (leuco)gabbrobronite de Steve du « gabbro de Steve ». ...	39
Figure 16: Photographies des lithologies du « gabbro de Steve » .....	40
Figure 17 : Photographie de granite à feldspath alcalin du secteur.....	41
Figure 18 : Photographies des minéralisations sulfurées de l'indice de Léo-Charl. ....	44
Figure 19: Microphotographie en LR de la minéralisation massive.....	45
Figure 20: Microphotographie de la minéralisation semi-massive.....	46
Figure 21: Microphotographie de la minéralisation disséminée.....	47
Figure 22 : Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude avec structures mesurées sur le terrain lors de cette étude .....	48
Figure 23: Stéréonets (hémisphère sud) des structures mesurées sur le terrain : foliation et linéation minérale dans la zone d'étude.. ....	50
Figure 24: La calcicité et % en Sr des différentes marges de la SALSJ et Mattawa .....	55
Figure 25: Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude montrant la distribution spatiale de la composition de plagioclase (par XRFp) dans les différentes lithologies de la SALSJ.....	55
Figure 26 : Diagrammes binaires de Harker. ....	61
Figure 27: Compositions globales de différentes lithologies normalisées à la chondrite de McDonough et Sun (1995).....	66
Figure 28 : Compositions globales de différentes lithologies normalisées au manteau primitif de Sun et McDonough (1989).....	67
Figure 29 : Diagrammes binaires d'éléments chalcophiles en fonction du S pour les lithologies anorthositiques et sulfures.....	69
Figure 30: Diagramme S/Se vs Pd+Pt illustrant la position des sulfures par rapport à ceux issus d'autres gisements.....	70

## **1. Introduction**

Les massifs anorthositiques protérozoïques sont abondants dans la Province de Grenville au Québec (Corriveau et al., 2007) et renferment des minéralisations orthomagmatiques riches en métaux critiques et stratégiques, tels qu'en Fe-Ti-V-P et Ni-Cu-Co (Hébert et al., 2009). L'intérêt économique de ces massifs anorthositiques a été démontré par l'exploitation d'un gisement de Fe-Ti-V-P de classe mondiale du Lac Tio au Québec dans la Suite anorthositique de Havre-Saint-Pierre (Woodruff et al., 2013), ainsi que par l'exploitation de gisement de Ni-Cu-Co de Voisey's Bay, au Labrador, associé à la Suite plutonique de Nain (Naldrett et al., 1996). Mieux comprendre les processus de formation de ces minéralisations dans les massifs anorthositiques, ainsi que leurs relations avec les roches hôtes, est essentiel pour améliorer les modèles d'exploration des gisements orthomagmatiques qui leur sont associés.

Ce projet de maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), dirigé par les professeures Sarah Dare et Renée-Luce Simard, en collaboration avec le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) représenté par Monsieur Abdelali Moukhsil, vise à mieux comprendre les processus métallogéniques responsables de la formation des minéralisations en sulfures de Ni-Cu associées à la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ). L'étude se focalise sur la marge Nord de la SALSJ, plus précisément dans la région du Lac à Paul, entre les indices Nourricier, MHY et Léo-Charl, situés dans les feuillets SNRC 22E15 et 22E16. Les objectifs de ce projet sont : i) caractériser les faciès, textures, structures et la composition géochimique des roches anorthositiques, les roches associées (mafiques à ultramafiques), et les types de minéralisations en Ni-Cu dans le secteur d'étude ; ii) déterminer la distribution spatiale des différentes caractéristiques des roches anorthositiques et des roches associées (mafiques à ultramafiques) ; iii) déterminer la ou les relation(s) entre les minéralisations Ni-Cu et les roches anorthositiques hôtes.

## **2. Méthodologie**

La méthodologie pour ce projet de maîtrise combine la cartographie géologique classique, l'échantillonnage, la pétrographie et les analyses géochimiques. Une première phase de compilation des données géologiques et géophysiques disponibles a été réalisée

à partir de la base de données SIGÉOM et des rapports d'exploration existants sur les principaux indices de Ni-Cu du secteur d'étude. Cette étape a permis d'optimiser le choix des transects de cartographie et d'échantillonnage, lesquels ont été positionnés perpendiculairement à la disposition des unités lithologiques afin d'assurer une couverture représentative du secteur d'étude.

Sur le terrain, la cartographie a été effectuée par la description des affleurements espacés d'environ 500 m ou à chaque changement majeur de lithologie, à l'aide des géofiches du MRNF et de la prise de notes classique dans des carnets de terrain. L'échantillonnage a été réalisé à l'aide de marteaux et de scies à roche. Chaque échantillon contenant des plagioclases de plus de 3 mm de diamètre a été tranché et préparé pour des analyses à la fluorescence X portative (XRFp) afin de caractériser la chimie des plagioclases dans le secteur d'étude (calcicité et contenu en Sr). Les échantillons sélectionnés ont ensuite été soumis à une caractérisation pétrographique (minéralogie et texture) par microscopie optique sur lames minces polies en lumière transmise et réfléchie.

De plus, des analyses géochimiques de roche totale ont été réalisées afin de déterminer la composition chimique des unités lithologiques. L'ensemble des résultats a été interprété à l'aide de diagrammes géochimiques traditionnels.

### **3. Contexte géologique général**

Ce projet de maîtrise étudie des minéralisations en Ni-Cu de la Suite anorthositique de Lac-St-Jean située dans la partie centrale de la Province de Grenville. Cette dernière, s'étend du Labrador, en passant par le centre du Québec (Figure 1), et se prolonge sous la surface jusqu'au Texas, aux États-Unis. Elle est le résultat de plusieurs orogénies successives durant le Protérozoïque, incluant l'Orogénie labradorienne (1680-1600 Ma), l'Orogénie pinwarienne (1520-1460 Ma), l'accrétion de Québécoise (1400-1370 Ma), l'Orogénie elzévirienne (1245-1225 Ma), et l'Orogénie shawinigan (1190-1140 Ma), culminant avec l'Orogénie grenvillienne terminale (1090-980 Ma ; Gower et al., 2008 ; Rivers, 2012). Cette dernière, divisée en phases Ottawan (1090-1020 Ma) et Rigolet (1005-980 Ma), a provoqué un métamorphisme de haute température, principalement au faciès

amphibolite et granulite, qui caractérise la Province de Grenville (Rivers, 2012 ; Indares, 2020).

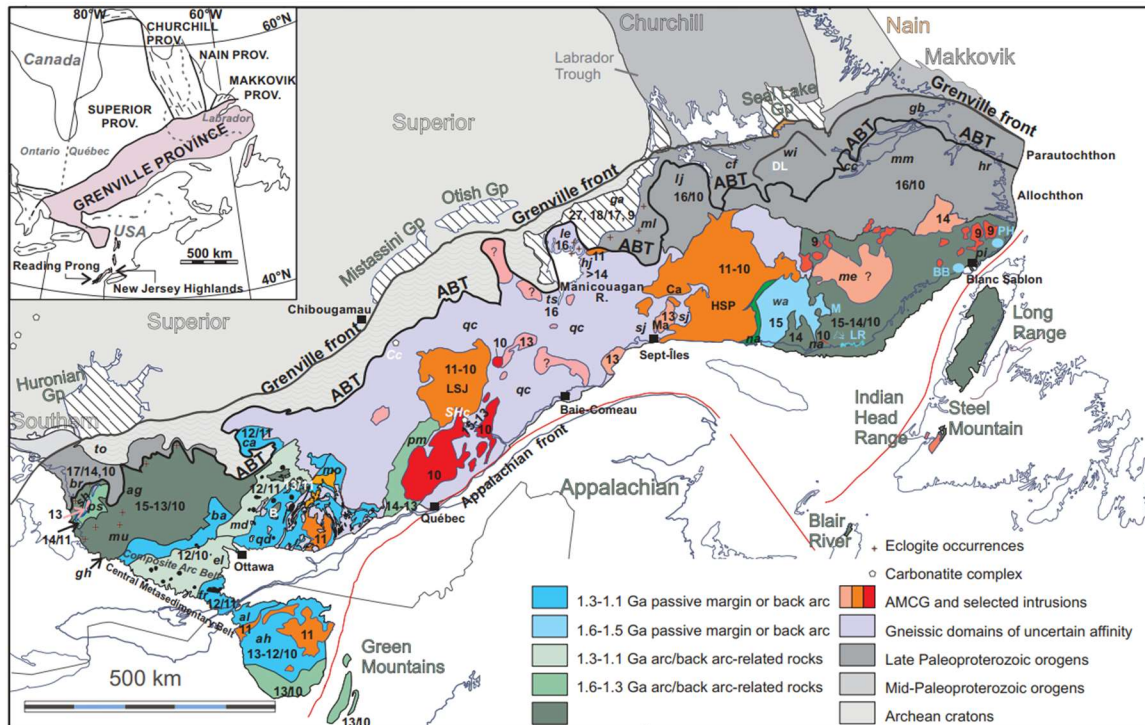


Figure 1 : Carte géologique de la Province de Grenville montrant les occurrences des suites anorthositiques, dont celle de Lac-Saint-Jean (LSJ). (Abréviations : HSP : Havre-Saint-Pierre et qc : Quebecia ; tirée de Corriveau et al. 2007).

L'Orogenèse grenvillienne, résultant d'une collision continent-continent datée entre 1190 et 980 Ma (Rivers et al., 1989), se distingue par une compression orientée nord-ouest sud-est, comprenant au moins trois épisodes de collision, chacune suivie de périodes de relaxation post-orogénique, favorisant une tectonique extensive (Higgins et van Breemen, 1992 ; Rivers, 1997). Ce processus a conduit à la formation des complexes Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite (AMCG) sur une période de 150 Ma entre 1160 Ma et 1010 Ma (Corrigan et Hanmer, 1997 ; Higgins et van Breemen, 1996 ; Rivers, 2015).

#### 4. La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ)

La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ), un terme utilisé pour la première fois par Hébert (1997), englobe les roches anorthositiques de Lac-Saint-Jean et d'autres roches intrusives felsiques à intermédiaires (Figure 2 ; Higgins et van Breemen,



1996). La SALSJ est localisée dans la partie centrale de la Province de Grenville, au cœur de la ceinture allochtone polycyclique (Figure 1 ; Rivers et al., 1989). Ce vaste massif anorthositique (20 000 km<sup>2</sup>) se compose de plusieurs lobes formés à la suite de multiples remontées diapiriques anorthositiques et injections de magma mafique-ultramafiques associées (Woussen et al., 1981 ; Hébert et Lacoste 2003 ; Hébert et Beaumier 2000a ; Hébert et van Breemen 2001 ; Hébert et Cadieux 2003a ; Hébert et al., 2005) datées entre 1160 et 1135 Ma (Higgins et van Breemen, 1996 ; Hébert et van Breemen 2004). La SALSJ s'est mise en place dans des gneiss migmatitiques principalement d'orthogneiss, de migmatites à compositions diverses, ainsi que d'une quantité mineure de roches supracrustales (Higgins et Van Breemen, 1992).

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

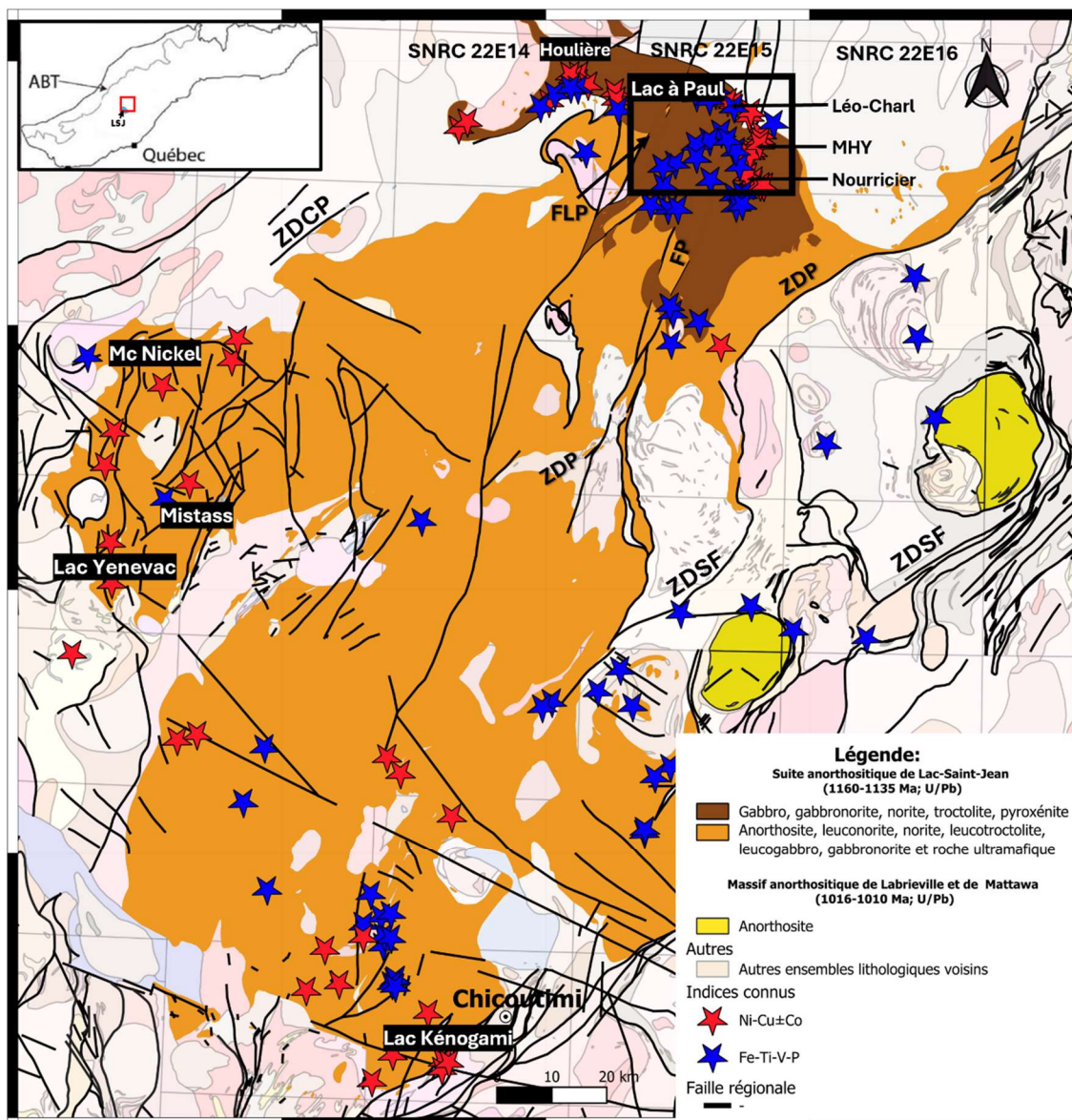


Figure 2 : Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean avec les indices de minéralisation de sulfures (Ni-Cu) et oxydes (Fe-Ti-V-P) et le contour de la zone d'étude (rectangle noir ; carte et légende modifiées de SIGÉOM, 2024). (Abréviations : FLP : Faïlle du Lac à Paul; FP : Faïlle de Pamouscachiou ; ZDCP : Zone de déformation de Chute-des-Passes; ZDP : Zone de déformation de Pimpuacan ; ZDSF : Zone de déformation de Saint-Fulgence.)

La formation et la mise en place de la SALSJ a fait l'objet de diverses interprétations au fil du temps. Initialement, Woussen et al., 1981 ont proposé un modèle de montée diapirique à l'état solide dans un environnement tectonique calme, avec une profondeur de consolidation estimée à environ 25-30 km. Higgins et Van Breemen (1992) ont suggéré que ces roches anorthositiques, résulteraient plutôt d'une ascension magmatique à travers des zones de cisaillement subverticales en décrochement, dans un contexte de convergence

tectonique. Corrigan et Hanmer (1997) ont proposé une alternative consistant en une mise en place sous extension crustale post-épaississement provoquée par des chevauchements. Les travaux de Daigneault et al. (1999) ont conclu que la SALSJ serait le produit d'un raccourcissement crustal NW-SE, caractérisé par des chevauchements NNW. Hébert (1999b) a identifié une faille NE-SW traversant la suite anorthositique (Zone de déformation de Pipmuacan ; Figure 2), interprétée comme un décrochement majeur potentiellement impliqué dans la mise en place de la SALSJ. Ces diverses interprétations soulignent la complexité des processus géologiques impliqués dans la formation de la SALSJ.

#### **4.1. Minéralisations Ni-Cu des marges ouest et sud de la SALSJ**

Dans la marge Ouest de la SALSJ, plusieurs indices de Ni-Cu ont été identifiés, notamment Mc Nickel, Lac Yenevac et Mistass (Figure 2). Les roches hôtes de ces minéralisations sont principalement constituées de gabbro et leuconorite, avec des compositions de plagioclase en anorthite de An<sub>50</sub> à Mistass, An<sub>49</sub> au Lac Yenevac et An<sub>44</sub> à Mc Nickel (Hassen Ali et al., 2023). À Mc Nickel, la minéralisation est composée de chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite et pyrite encaissée dans des lithologies gabbroïques (Figure 2 ; Tremblay et Girard, 2011). Ces sulfures présentent différentes textures : massive (30 % des occurrences), en veinules (50 %) et disséminée (10 à 20 % ; Tremblay et Girard, 2011). Certains amas sulfurés se manifestent également sous forme de lentilles (Mountain, 1989). Les ressources minérales de Mc Nickel sont estimées à 5,85 Mt, avec des teneurs de 0,209 % en Ni, 0,106 % en Cu et 0,029 % en Co (Clark et Hébert, 1998 ; Hébert et al., 2005). Des analyses plus récentes montrent des teneurs en Ni comprises entre 0,08 et 0,75 %, en Cu entre 0,05 et 1,1 %, et en Co entre 0,01 et 0,41 % (Tremblay et Girard, 2011). La minéralisation du Lac Yenevac est encaissée dans une anorthosite gabbroïque massive (Figure 2 ; Block et al., 2010). Elle est principalement constituée de pyrrhotite et de chalcopyrite, tandis que la pyrite y est présente sous forme disséminée ou en amas millimétriques à centimétriques dans la matrice gabbroïque (Block et al., 2010). Les analyses géochimiques indiquent des teneurs en Ni comprises entre 0,26 et 1,20 %, et en Cu entre 0,19 et 0,87 % (Block et al., 2010). La minéralisation de Mistass est encaissée dans une anorthosite gabbroïque (Figure 2). Les concentrations en métaux varient selon le

type de minéralisation. Pour les sulfures massifs, les teneurs en Ni sont comprises entre 0,46 et 0,64 %, tandis que celles en Cu avoisinent 0,1 % (Ouellet, 2014). Les sulfures disséminés présentent des concentrations en Ni allant de 4380 à 9950 ppm, en Cu de 4020 à 7440 ppm, avec une valeur maximale enregistrée à 56 000 ppm (Tremblay, 2007). Le cobalt y est présent en quantité variant entre 562 et 1565 ppm, tandis que l'Au affiche des teneurs comprises entre 14 et 18 ppb (Tremblay, 2007).

Dans la marge Sud de la SALSJ, l'indice de Ni-Cu du Lac Kénogami (Figure 2) présente des sulfures sous forme de lentilles massives ( $1 \times 2$  m ; Vaillancourt, 2001). La roche hôte est un dyke de gabbronorite et harzburgite, caractérisé par la présence de bréchification (Vaillancourt, 2001). Le contenu en forstérite des olivines est de Fo<sub>86</sub>, tandis que le contenu en anorthite des plagioclases varie entre An<sub>65</sub> et An<sub>90</sub> indiquant un magma primitif (Vaillancourt, 2001). Les sulfures massifs ont des teneurs de 2,8 % Ni, 1,1 % Cu et 1 ppm Pt+Pd. Le Mg# varie de 43 à 60 dans les gabbronorites non minéralisées, de 56 à 78 à l'indice Dumont et de 62 à 67 à l'indice Gagnon (Figure 2 ; Vaillancourt, 2001).

#### **4.2. Géologie locale du secteur de Lac à Paul**

Le secteur d'étude est situé dans la partie nord de la SALSJ (Figures 2 et 3). Ce secteur a fait l'objet d'une cartographie à l'échelle de 1 : 250 000 en 1975 (Laurin et Sharma, 1975a, 1975b). En 1994, le ministère des Ressources naturelles a réalisé un relevé aéromagnétique incluant le secteur d'étude (Dion et Dumont, 1994). Par la suite, une nouvelle cartographie à l'échelle de 1 : 50 000 a été effectuée par le ministère des Ressources naturelles (Hébert et Beaumier, 2000), représentant la dernière mise à jour pour le secteur. Depuis, plusieurs projets de maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi ont été réalisés dans ce secteur. Turcotte (2001) a effectué une étude structurale, Huss (2002) a étudié quelques indices de Ni-Cu présents dans le secteur (Paul, Houlière, Manouane et Nourricier) et Fredette (2006) a réalisé une étude sur la caractérisation géochimique, pétrographique et l'évaluation du potentiel économique des lithologies enrichies en Fe-Ti-P (ilménite, magnétite et apatite) du secteur. Ces travaux réalisés dans le secteur, en plus des travaux de synthèse menés par Hébert et al., (2009), ont documenté les roches anorthositiques appartenant à la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean de ce secteur. Ces roches sont constituées de gabbronorite avec ou sans oxydes de Fe-Ti-P (mPlsj1 ; Hébert et al., 2009 ; Figure 3) ; d'anorthosite, de

leuconorite, de gabbro, de norite, de niveaux de roches ultramafiques et de gabbronorite à oxydes de Fe-Ti (mPlsj2) ; de leuconorite, d'anorthosite, de norite, de troctolite et de leucotroctolite, de niveaux de pyroxénite, de péridotite, de nelsonite, de dunite, ainsi que de magnétite à ilménite et apatite (mPlsj3). On y trouve également du gabbro microcoronitique (gabbro de Steve ; mPlsj6). Tous ces faciès montrent un enrichissement variable en Fe-Ti-P (Fredette, 2006). Localement, des minéralisations en Ni- Cu sont présentes, associée à la bordure de l'unité mPlsj3, dans la zone de contact avec le gabbro de Steve (mPlsj6 ; Figure 3 ; Huss, 2002).

Dans la partie sud-ouest du secteur, affleure le pluton du Granite de La Carpe (mPcar1 ; Hébert et al., 2009). Cette intrusion est constituée de charnockite et de monzonite, avec ou sans hypersthène, ainsi que des enclaves d'anorthosite appartenant à la SALSJ (Hébert et Beaumier, 2000, Hébert, 2000, Hébert et al., 2009). L'âge obtenu pour cette intrusion est  $1028 \pm 2$  Ma (Figure 3 ; Van Breemen, 2009).

Les unités de la SALSJ, dans ce secteur, chevauchent la zone de contact nord-est entre la SALSJ au sud et le complexe gneissique de Rouvray (mProu ; Hébert et Cadieux, 2003) au nord (Hébert et Beaumier, 2000 ; Turcotte, 2001). Un âge de  $1484 \pm 30$  Ma (U-Pb) a été obtenu sur un échantillon d'orthogneiss mangéritique pour ce complexe (Van Breemen, 2009). Cet encaissant gneissique est subdivisé en trois unités : mProu1, mProu2 et mProu2a (Hébert et al., 2009). Seules les unités mProu1 et mProu2 affleurent dans le secteur (Figure 3). L'unité 1 (mProu1) est constituée d'orthogneiss granulitique (charnockite, mangérite) avec une composante dioritique et gabbronoritique, de gneiss granitique, de gneiss quartzofeldspathique, ainsi que de lambeaux de quartzite, paragneiss et amphibolite. Quant à l'unité 2 (mProu2), elle est constituée de gneiss grisâtres, plus ou moins rubanés, de composition granodioritique à tonalitique, d'amphibolite et de gneiss granitique (Hébert et al., 2009).

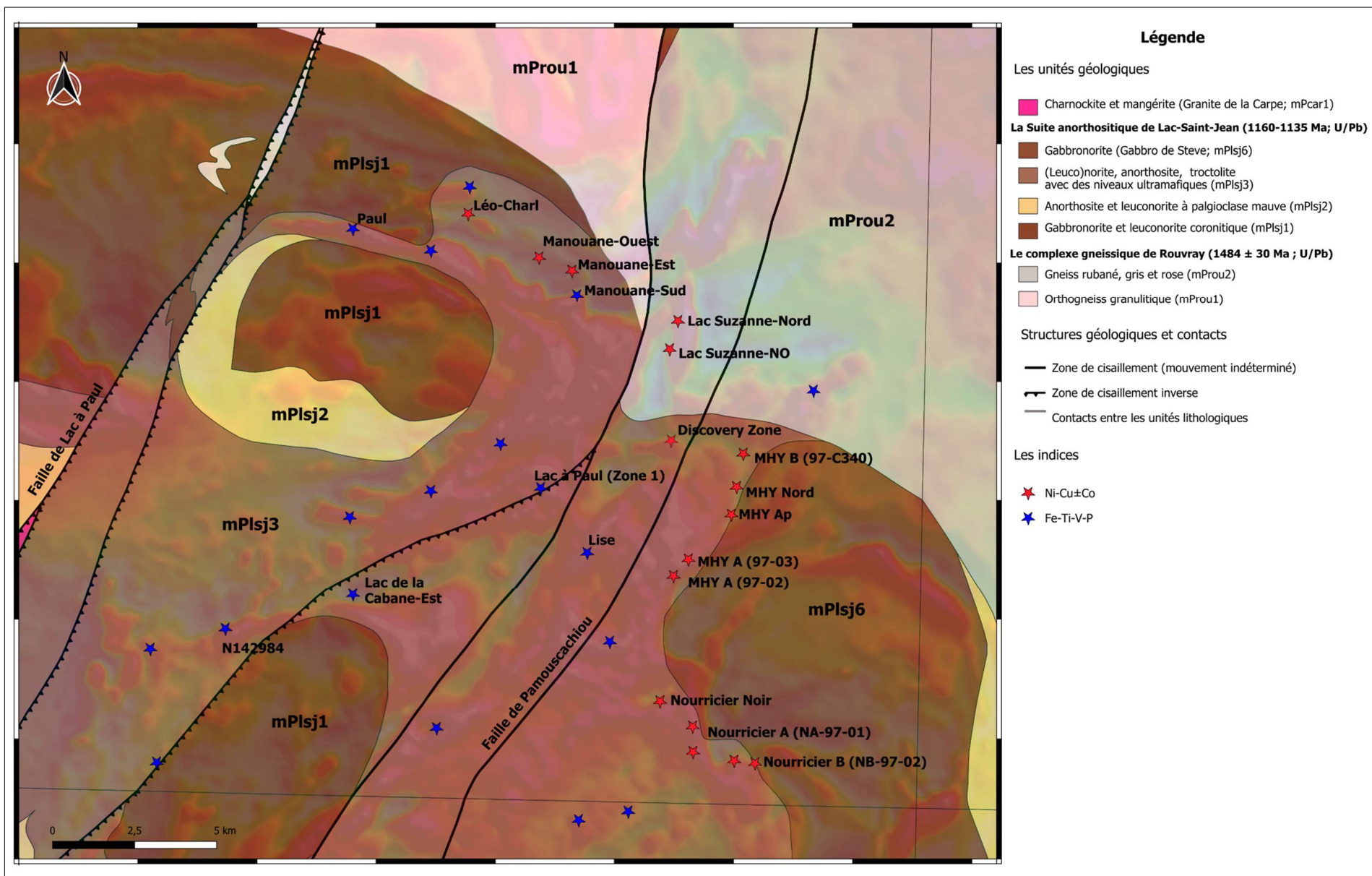


Figure 3 : Carte géologique sur fond géophysique de secteur de Lac à Paul montrant les différentes unités de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, indices Ni-Cu et Fe-Ti-P-V (modifiée d'après SIGÉOM, 2024).



#### **4.2.1. Minéralisations Ni-Cu de la marge nord de la SALSJ**

Plusieurs indices Ni-Cu se retrouvent dans la marge nord-est de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, particulièrement dans les régions du Lac à Paul (22 E 15 ; Hébert et Beaumier, 2000a) et de Chute-des-Passes (Figure 2 ; 22 E 14 ; Hébert et Beaumier, 2000b). Une douzaine d'indices y ont été découverts entre 1970 et 2000 (Roy, 2001a), et la présence de troctolite dans ce secteur suggère un environnement géologique potentiellement analogue à celui de Voisey's Bay au Labrador (Francoeur, 1998 ; Huss, 2002).

Le secteur a fait l'objet de plusieurs campagnes de prospection. Les premiers travaux d'exploration dans le secteur remontent aux années 1970, initiés par le ministère des Ressources naturelles et la compagnie NQN Mines. Au début, la compagnie NQN Mines a mené des levés géophysiques, de la cartographie géologique ainsi que des forages dans la région (Depatie, 1971). En 1971, la compagnie SOQUEM a effectué des forages verticaux sur une anomalie géophysique identifiée par la compagnie NQN Mines. Entre 1986 et 1988, le prospecteur Lionel Lefebvre a réalisé l'excavation de tranchées sur des indices de Ni-Cu découverts au début des années 1970. Entre 1994 et 1995, le Fonds Minier du Saguenay-Lac Saint-Jean a fait évaluer certains indices de Ni-Cu dans le secteur par la compagnie IOS Services Géoscientifiques, suivi par des travaux de prospection en 1996.

En 1997, la compagnie Mines d'Or Virginia a réalisé deux levés électromagnétiques et magnétiques héliportés dans le secteur du Lac à Paul (Francoeur, 1998) et a jalonné plusieurs claims. Ces efforts ont permis de découvrir de nouveaux indices de cuivre et de nickel, notamment Houlière, de Paul, Nourricier et MHY (Figures 2 et 3 ; Poirier et Granger, 1998) qui ont été au cœur du projet de maîtrise de L. Huss en 2002. Selon ces travaux, les indices de Nourricier A (NA-97-01) et Nourricier A (97-C235) se caractérisent par une lithologie dominée par de la leucotroctolite, avec des enclaves d'anorthosite, de paragneiss, et de gabbro à amphibole et biotite. La minéralisation y est dominée par la pyrrhotite, atteignant jusqu'à 90 %, accompagnée de chalcopryrite (1 à 5 % ; Poirier et Granger, 1997 ; Francoeur 1998 et Roy 2001a). Nourricier Noir, situé à 2,5 km au sud-est de Nourricier A, présente des lithologies de troctolite à apatite avec des enclaves d'anorthosite et paragneiss, avec une minéralisation de sulfures massifs composée de 80 % de pyrrhotite et de 1 % de chalcopryrite (Poirier et Granger, 1997 ; Francoeur 1998 et Roy



2001a). Plus au sud, Nourricier B montre des lithologies de mélanogabbro et de troctolite, avec des sulfures massifs contenant jusqu'à 90 % de pyrrhotite (Poirier et Granger, 1997 ; Francoeur 1998). L'indice de MHY B (97-C340) est dominé par des leucogabbros grossiers, où la minéralisation en sulfures massifs est riche en pyrrhotite (85-95 %) et en chalcoppyrite (5 % ; Francoeur 1998 et Roy 2001b). L'indice de MHY Nord présente des leucogabbros foliés avec des horizons de sulfures massifs contenant jusqu'à 95 % de pyrrhotite avec des quantités moindres de chalcoppyrite (traces à 5 %) et de pyrite (jusqu'à 5 % ; Roy 2001a et Roy 2001c). Enfin, l'indice de MHY Ap (Gravi) se distingue par une alternance de leucogabbro et d'anorthosite, où les horizons de sulfures massifs contiennent 80 % de pyrrhotite et 2-3 % de chalcoppyrite (Roy 2001a). Les sections de reconnaissance en 1997 ont également révélé un potentiel intéressant en apatite (Lévesque, 1999).

En 2000, la compagnie SOQUEM a pris des parties des propriétés de la compagnie Mines d'Or Virginia et a entrepris des travaux de sondage et de cartographie détaillée (Boivin, 2002). De plus, des prospecteurs du Fonds Minier du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont jalonné plusieurs claims dans cette région après une campagne d'exploration couvrant une superficie de 18730 hectares (Hébert, 2000). La compagnie Mines d'Or Virginia et SOQUEM ont réalisé divers programmes de travaux, y compris : géophysique, prospection, cartographie, échantillonnage en surface et forage au diamant dans le secteur, mais ont laissé expirer leur propriété faute de résultats probants.

L'étude de Huss (2002) sur des minéralisations des sulfures de Ni-Cu du secteur de Lac à Paul suggère que ses minéralisations sont d'origine magmatique et associées à la bordure de la SALSJ, où les roches hôtes dominantes sont des lithologies noritiques. La minéralisation ne montre aucune bréchification, ce qui indique l'absence d'injections multiples de magma (Huss, 2002). Le contenu en forstérite des olivines dans les lithologies de ce secteur varie entre Fo<sub>58</sub> et Fo<sub>66</sub>, tandis que le contenu en anorthite se situe entre An<sub>40</sub> et An<sub>46</sub> (Huss, 2002). Les teneurs moyennes des sulfures massifs et semi-massifs du secteur de Lac à Paul sont d'environ 0,66 % Ni, 1,2 % Cu, 0,06 % Co et 55 ppb Pd (Huss, 2002). L'extrême pauvreté en éléments du groupe du platine (ÉGP) des échantillons, ainsi que la faible teneur en Ni des olivines de la région de Lac à Paul, reflètent une évolution magmatique avancée (Huss, 2002).

En 2022 Canada Silver Cobalt Works (CCW) a acquis des parties de la propriété auparavant détenues par Mines d'Or Virginia, SOQUEM et Globex Mining Enterprises Inc.,. De juillet 2021 à juillet 2022, un total de 64 sondages a été réalisé par Laurentia Exploration pour CCW dans le cadre du projet Graal. Le forage a été réalisé par Diafor Inc. et Les Forages Géo-Nord Inc. de juillet 2021 à février 2022 (incluant NRC-21-01 à NRC-22-29), puis par Forage Dami-Or de mai 2022 à juillet 2022 (incluant GRL-22-30 à GRL-22-61). CCW a découvert une nouvelle zone (Discovery Zone ; Figure 3) avec des sulfures massifs à 2500 m au nord-ouest de la minéralisation historique connue (indice MHY Nord). Le programme de forage 2021-2022 a également étendu l'empreinte minéralisée en Ni-Cu des indices MHY Nord (MHY Zone) et MHY Ap (Gravi Zone). Les teneurs composites d'intérêt de la campagne 2021-2022 incluent 0,84 % Ni, 0,59 % Cu et 0,09 % Co sur 5,7 m dans NRC-21-03 (Discovery Zone), 0,32 % Ni, 0,45 % Cu et 0,04 % Co sur 33,6 m dans NRC-22-24 (Gravi Zone) et 0,73 % Ni, 0,41 % Cu et 0,09 % Co sur 5,7 m dans GRL-22-60 (MHY Zone ; Duplessis et al., 2024). Ces minéralisations ont été encaissées dans des horizons de norite et de leuconorite (Duplessis et al., 2024). À la suite de la signature d'une convention d'arrangement le 13 septembre 2023, CCW a transféré la propriété à sa filiale Coniagas Battery Metals (CBM ; Duplessis et al., 2024).

## **5. Observations de terrain 2024**

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, le secteur d'étude a été cartographié à l'été 2024 lors d'une campagne de terrain de 10 jours en juin 2024 dans le secteur de Lac à Paul (Figure 4), au cours de laquelle 59 affleurements ont été examinés, pour un total de 84 échantillons collectés. La majorité des échantillons ont été prélevés sur le feuillet SNRC 22E15, tandis que quelques-uns proviennent du feuillet SNRC 22E16.

Les indices de Ni-Cu de Nourricier, MHY et Léo-Charl ont été visités. À l'exception de Léo-Charl, aucuns sulfures ne sont exposés en surface (< 5 % à Nourricier et MHY ; voir détails ci-bas). Les tranchées réalisées par Mines d'Or Virginia dans les années 1997-2000 sont complètement repoussées et n'ont permis ni une cartographie détaillée ni un échantillonnage des minéralisations. L'indice MHY mis à jour par la compagnie Canada en 2022 par Silver Cobalt Works (CCW), grâce à des forages réalisés dans le cadre du projet Graal, n'affleure pas. Des sections de forage entreposées à

l'extérieur de la zone d'étude permettront d'étudier et de caractériser cette minéralisation dans les mois qui viennent. Seuls les sulfures massifs et semi-massifs de l'indice Léo-Charl sont exposés en surface et ont fait l'objet de descriptions détaillées et d'un échantillonnage lors de cette campagne de terrain (voir détails ci-bas).

Lors de la campagne de cartographie, diverses lithologies ont été observées dans le secteur d'étude, soit le socle au nord composé du Complexe de Rouvray, et au sud la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. Des descriptions des principales unités sont présentées dans cette section selon l'ordre d'abondance et de plus anciennes au plus jeunes.

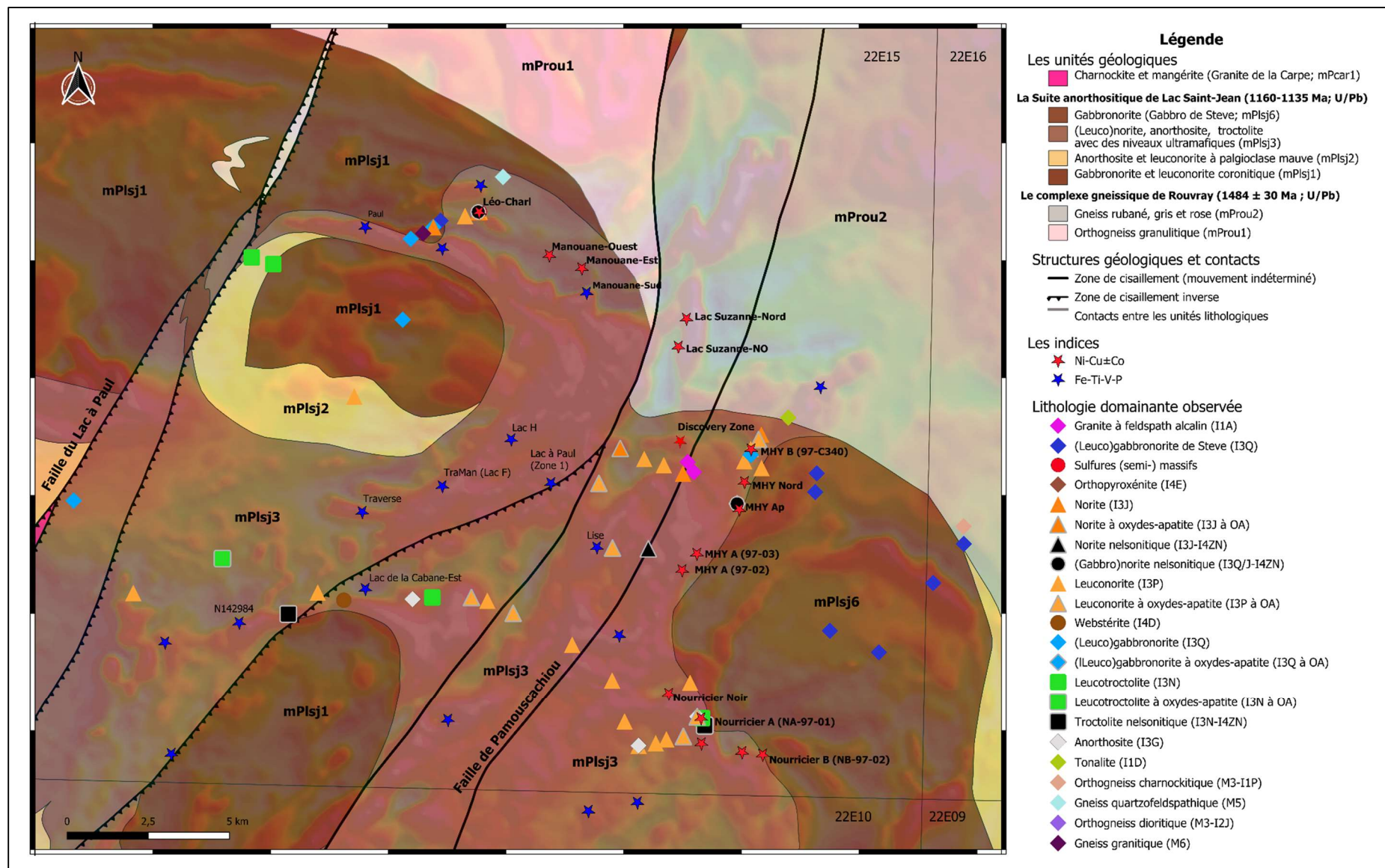


Figure 4: Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude avec l'emplacement des échantillons, et indices Ni-Cu et Fe-Ti-P-V (modifiée d'après SIGÉOM 2024).

## 5.1. Gneiss du Complexe de Rouvray

La partie nord du secteur est composée des gneiss du Complexe gneissique de Rouvray (mProu; Figure 4; Hébert et Cadieux, 2003). De manière générale, ce complexe est formé de gneiss rubanés granodioritiques à tonalitiques, d'amphibolites, de gneiss granitiques roses, ainsi que de niveaux de gneiss à grenat  $\pm$  sillimanite (Hébert et Cadieux, 2003). L'unité mProu1 (Hébert et al., 2009) de ce complexe se distingue par une signature magnétique très forte, orientée NNW-SSE, quant à l'unité mProu2 (Hébert et al., 2009) du complexe, présente un patron magnétique généralement faible à moyen (Figure 4). Seuls quelques affleurements des deux unités (mProu 1 et mProu 2) du complexe ont été visités lors de la cartographie (Figure 4).

### 5.1.1. L'unité mProu1

Les affleurements de l'unité mProu1 du Complexe gneissique de Rouvray, visités et décrits ici, correspondent à des gneiss formant des feuillets de jusqu'à 30 mètres d'épais faillés au sein de la leuconorite des unités mPlsj1 et mPlsj3 de la SALSJ, dans la portion NW du secteur (Figure 4). Les affleurements étudiés révèlent trois types de gneiss.

Le *gneiss quartzofeldspathique* présente une surface altérée grisâtre et une surface fraîche gris noirâtre. La granulométrie est fine (taille moyenne d'environ 1 mm). La roche a une texture gneissique définie par des fines bandes millimétriques leucocratiques riches en quartz et des bandes plus riches en biotite (Figure 5 A). Sa minéralogie comprend principalement du quartz saccharoïde (70 %), de la biotite (20 %), du plagioclase (10 %) et une faible proportion de clinopyroxène (1 %). Ces gneiss sont recoupés par de petits dykes pegmatitiques roses tardifs de composition granitique, dont l'épaisseur varie de 1 à 20 cm.

Des feuillets de *gneiss dioritiques* se caractérisent par une couleur noir-blanchâtre en surface altérée et noirâtre en surface fraîche. La roche présente une granulométrie fine à très fine et une texture gneissique définie par les fines bandes millimétriques de hornblende et biotite et plagioclase (Figure 5 B). Sa minéralogie est dominée par la hornblende (45 %, noire, 0,5-2 mm), le plagioclase (35 %, blanc, < 1 mm), et la biotite (15 %, en feuillets), avec des proportions mineures de magnétite (3 %) et d'ilménite (1 %).



Associés à ces gneiss mafiques, on trouve également des *gneiss granitiques*, de couleur gris rosé en surface altérée et en surface fraîche (Figure 5 C). La granulométrie est fine, et la texture est gneissique. La gneissosité est caractérisée par une alternance de bandes grisâtres centimétriques (2-30 cm) riches en quartz (58 %), biotite (20 %) et plagioclase (15 %), et de bandes rosées millimétriques (1-5 mm) dominées par l'orthose (40 %), le quartz (30 %) et le plagioclase (20 %).

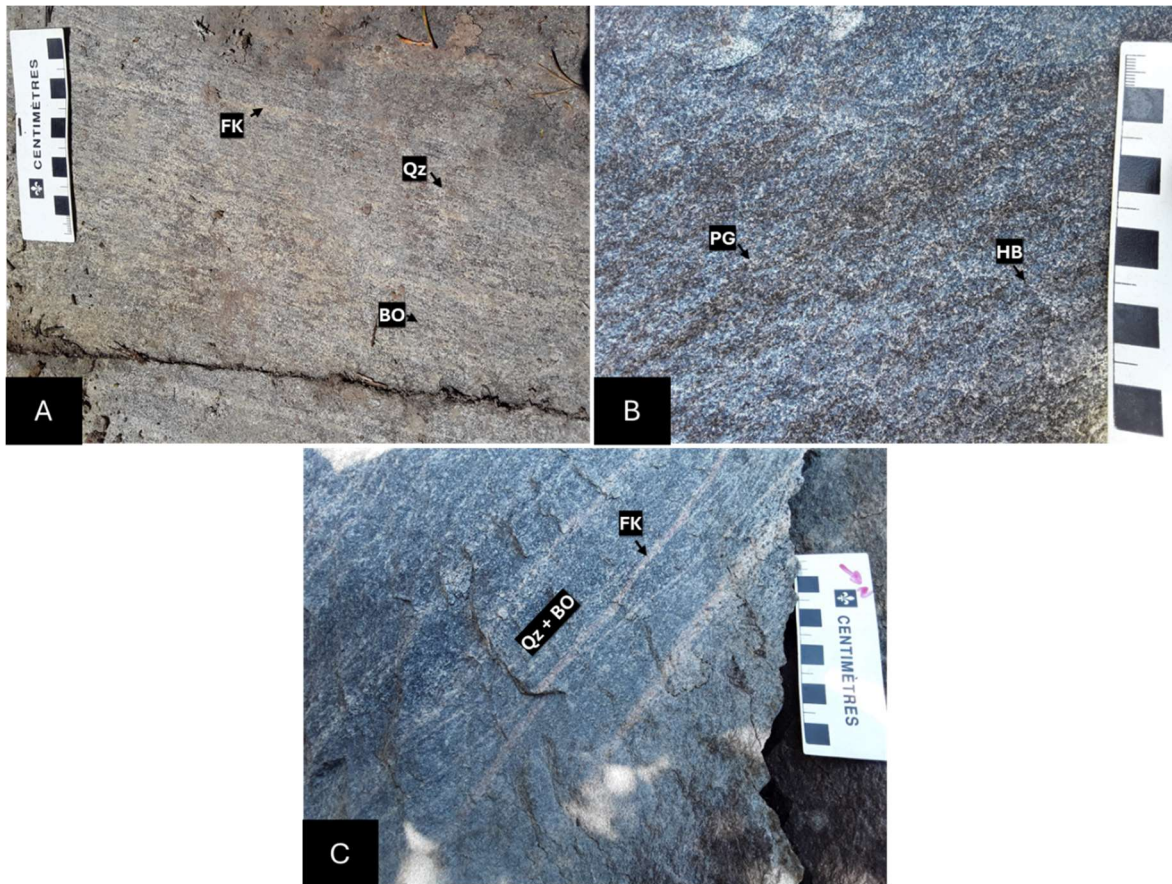


Figure 5 : Photographies des gneiss de l'unité mProu1 du Complexe de Rouvray : A) gneiss quartzofeldspathique (24-OB-7034-A ; B) gneiss dioritique (24-OB-7038-A) ; C) gneiss granitique (24-OB-7038-B). (Abréviations : BO : Biotite ; FK : Feldspath potassique ; HB : Hornblende ; PG : Plagioclase ; QZ : Quartz).

### 5.1.2. L'unité mProu2

Deux affleurements de l'unité mProu2 du Complexe gneissique de Rouvray ont été visités. Ces affleurements se trouvent au nord du « gabbro de Steve » (mPlsj6 ; Figure 4 ; Hébert et al., 2009).

Un *orthogneiss charnockitique* très déformé a été documenté lors de cette étude. Sa couleur est beige gris en surface altérée et beige rosé en surface fraîche (Figure 6 A). La granulométrie est fine à moyenne. La texture de la roche est gneissique, caractérisée par l'alternance de bandes centimétriques leucocrates (30 %, 0,5-2 cm d'épaisseur) et mélanocrates (60 %, 1-5 cm ; Figure 6 B). Les bandes mélanocrates contiennent 40 % de feldspaths potassique (taille <1 mm), 30 % de biotite (1-2 mm), 25 % de quartz (1-2 mm), moins de 5 % d'orthopyroxène (taille <1 mm), et 1 % de magnétite. Les bandes leucocrates comprennent 40 % de feldspath potassique (1-3 mm), 30 % de quartz (1-3 mm), 15 % de plagioclase (0,5-2 mm), 10 % de biotite, moins de 5 % d'orthopyroxène, et 2 % de magnétite. La gneissosité observée marquée par la biotite est plissée le long de plis isoclinaux et présente un faible pendage (gneissosité : 175/31° ; Figure 6 B), ainsi qu'une linéation faiblement inclinée vers le sud (208/32°). On observe également des injections locales de granite pegmatitique déformées, dont l'épaisseur varie de 5 à 40 cm (Figure 6 A).

Un *orthogneiss tonalitique*, de couleur beige gris rouille en surface altérée et gris noirâtre en surface fraîche (Figure 6 C et D) également été documenté. Cette unité est généralement homogène et légèrement magnétique. La granulométrie est finement grenue (< 1mm). Sa minéralogie est composée de 45 % de plagioclase, 35 % de quartz, 10-15 % de biotite brune, 2 % de magnétite, et 1 % d'orthopyroxène. La roche présente une gneissosité généralement nord-sud, faiblement à modérément inclinée (175/42°), définie par l'alignement de la biotite mesurée à N175/42°, définie par la biotite (Figure 6 D).



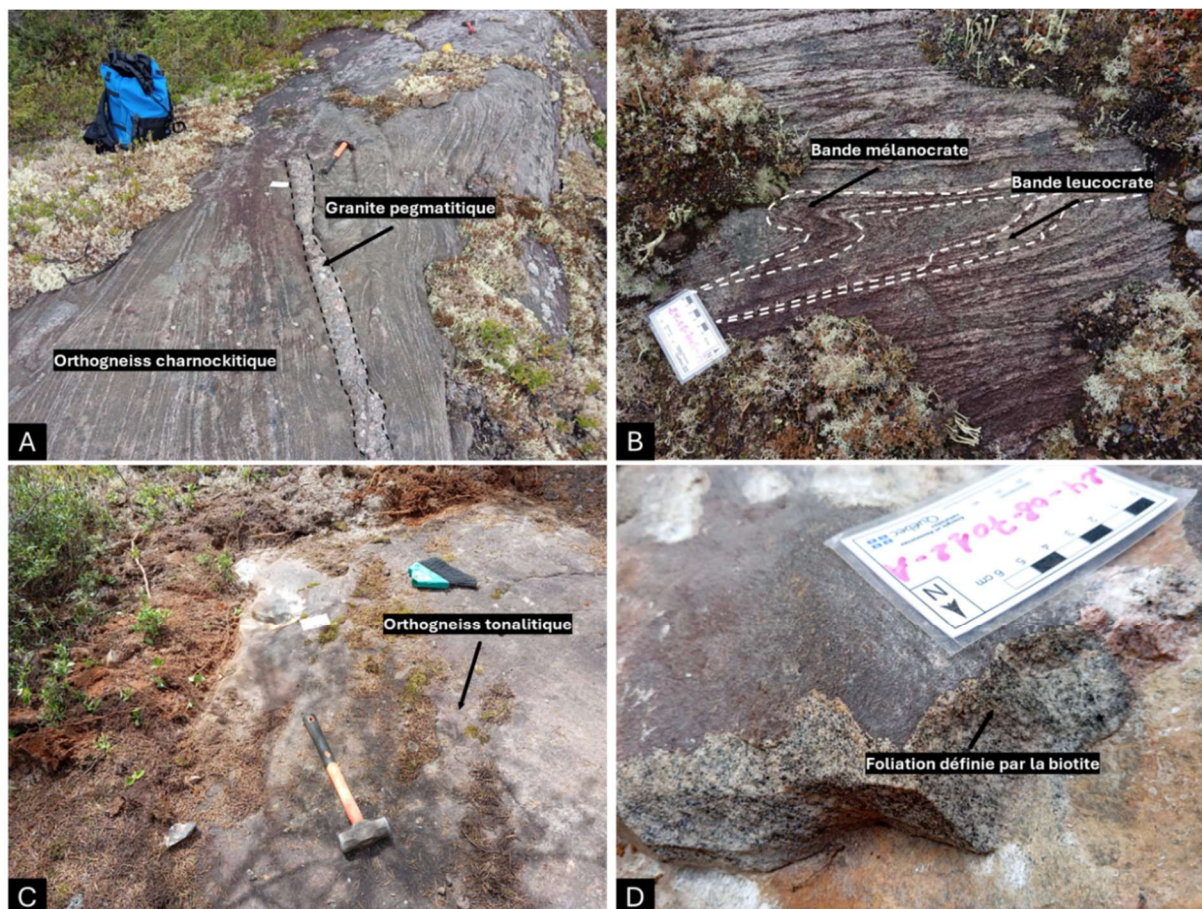


Figure 6 : Photographies des gneiss de l'unité mProu2 du Complexe de Rouvray : A) gneiss charnockitique recoupé par un dyke du granite pegmatitique (24-OB-7005-A) ; B) alternance de bandes mélanocrates et leucocrates dans le gneiss charnockitique ; C) aspect général du gneiss tonalitique en surface altérée (24-OB-7012-A) ; D) foliation faiblement inclinée du gneiss tonalitique (24-OB-7012-A).

## 5.2. La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ)

Dans le cadre de cette étude, pour la nomenclature des lithologies comportant des pourcentages anormalement élevés en oxydes et/ou apatite, le suffixe « à oxydes-apatite » est utilisé lorsque le pourcentage en apatite est compris entre 5 et 15 %, et le suffixe « nelsonitique » lorsque le pourcentage en apatite est supérieur à 15 %.

### 5.2.1. (Leuco)norite et (leuco)gabbronorite

Ces lithologies sont les plus dominantes dans le secteur d'étude. Elles appartiennent aux unités mPlsj1, 2, 3 et 6 (Figure 4) de la SALSJ. Sur le terrain, il était impossible de différencier les orthopyroxènes des clinopyroxènes. Seuls les orthopyroxènes ont été

clairement identifiés sur le terrain. C'est pour cette raison que, dans ce rapport, les (leuco)norites et les (leuco)gabbronorites sont traités ensemble, car elles partagent les mêmes caractéristiques de terrain, à l'exception des proportions de clinopyroxène et d'orthopyroxène seulement observables en lames minces.

Les (leuco)norites et les (leuco)gabbronorites présentent une couleur grise à beige-gris, parfois gris-noirâtre en surface altérée, et une couleur gris-violet à mauve foncé en surface fraîche, dépendant de la quantité de ferromagnésiens (Figures 7 A et B). Ces lithologies varient de finement grenues à très grossièrement grenues (Figures 7 C et E). Elles présentent une structure généralement massive localement litée, ainsi qu'une texture généralement grenue, coronitique, parfois, pegmatitique, ou subophitique.

La minéralogie des (leuco)norites et les (leuco)gabbronorites est constituée de 35 à 80 % de plagioclase généralement gris noirâtre (Figure 7 B) à mauvâtre, subidiomorphe à xénomorphe, mesurant de 1 à 5 cm. Les plagioclases présentes généralement une extinction roulante (Figure 8 A et B). Dans certaines lames, le plagioclase est fortement recristallisé en multiples sous-grains, surtout en bordures de grains, en raison de la déformation, ce qui se reflète en affleurement par des plagioclases blanchâtres (Figure 7 A). Les plagioclases sont localement séricitisés. L'abondance de l'orthopyroxène varie entre 1 et 25 % dans les (leuco)norites et entre 1 à 15 % dans les (leuco)gabbronorites. En affleurement les orthopyroxènes sont brunâtres à noirâtres, idiomorphes à subidiomorphes dans les roches les moins déformées, et xénomorphes dans les roches déformées (Figure 8 A). Ils mesurent entre 0,5 et 10 cm et se caractérisent parfois par une extinction roulante. On note également la présence d'exsolutions de clinopyroxène dans certains orthopyroxènes (Figure 8 C). Les orthopyroxènes les moins altérés sont généralement entourés de couronnes de hornblende et de biotite, tandis qu'ils sont totalement remplacés par la hornblende dans les roches les plus altérées (Figure 8 D). Le clinopyroxène est présent en proportion de 1 à 5 % dans (leuco) norites, et entre 1 à 25 % dans (leuco)gabbronorites, et présente les mêmes caractéristiques que l'orthopyroxène en termes d'altération et déformation (Figure 8 A). L'olivine, lorsqu'elle est présente, varie entre 2 et 5 % et mesure entre 2 et 5 mm. Elle est souvent fracturée (Figure 8 B) et faiblement altérée au niveau des fractures en iddingsite

et/ou en serpentine. Dans certaines lames minces, on observe une couronne d'orthopyroxène en bordure d'olivine au contact de plagioclase.

L'apatite est relativement abondante dans ces roches (1 à 20 %). Elle se présente sous forme de grains blanchâtres, subarrondis et fracturés (Figure 7 A, B et D) mesurant entre 1 mm et 1 cm. Localement, elle montre une association spatiale avec les oxydes. L'abondance d'ilménite varie entre 1 et 7 %, avec des grains mesurant entre 2 et 8 mm. L'ilménite est parfois en grains isolés et parfois en exsolutions dans la magnétite. Des exsolutions d'hématite dans l'ilménite ont été observées localement (Figure 8 E). La magnétite est présente entre 0 et 6 %, soit en grains isolés, soit en association avec la pyrrhotite au niveau des bordures et/ou fractures de cette dernière (Figures 8 E et F). On observe parfois des exsolutions de spinelle (< 1 %) dans la magnétite.

Les sulfures sont présents sous forme de grains xénomorphes de pyrrhotite (0 - 2 %), plus ou moins fracturés et bordés ou partiellement remplacés par la magnétite. La pyrrhotite contient parfois de petites flammes de pentlandite (0 – 1 % ; Figure 8 F). La chalcopryrite est présente en proportion de 0 à 1 %. Elle se trouve généralement sous forme d'amas irréguliers et de filonnets dans la pyrrhotite et parfois sous forme de petites veines dans les fractures des silicates. La pyrite est également présente localement (<1 % ; Figure 8 F).

La hornblende (1 à 35 %) se présente généralement sous forme de couronnes autour des pyroxènes (Figures 7 B et 8 D), et/ou de l'olivine, et les remplace parfois totalement. La biotite (1 à 25 %) est aussi présente sous forme de couronnes et en grains isolés. Dans certaines lames, elle forme des couronnes autour des oxydes (Figure 8 D). Sur le terrain, du grenat rose (1 %) localement, subidiomorphe, mesurant entre 2 et 5 mm, a été observé.

Lors que présents, la foliation ainsi que les zones mylonitisées (Figure 7 F), sont définies par l'alignement des minéraux ferromagnésiens (hornblende, biotite et pyroxène) dans ces lithologies. Des enclaves de gabbro norite à grain fin gris-noirâtre, allongées et parfois parallèles à la foliation, sont également présentes localement. Ces enclaves peuvent atteindre environ 3 m sur 10 m (Figure 7 E).



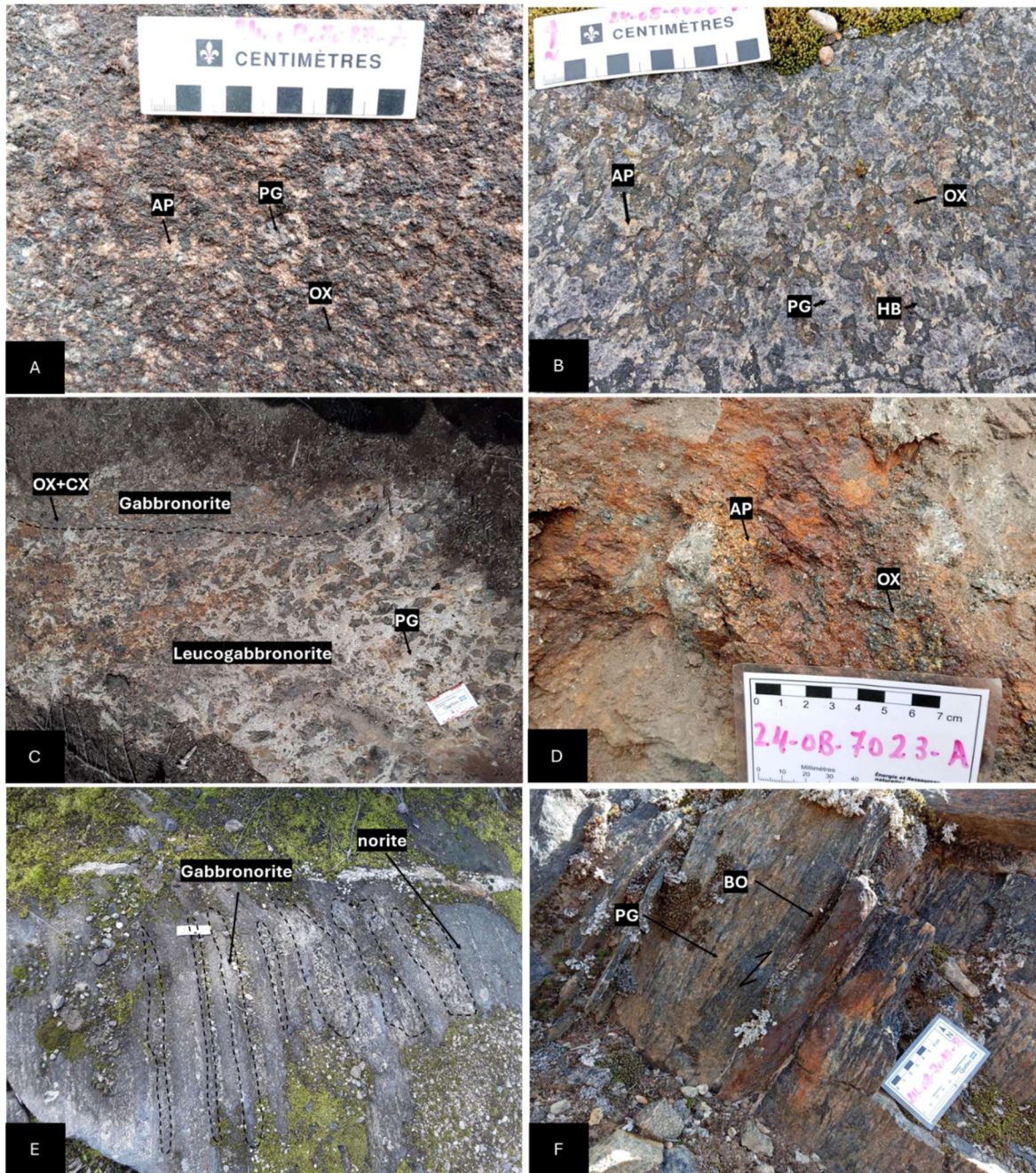


Figure 7 : Photographies de leuco/(gabbro)norite de secteur d'étude. A) norite à oxydes-apatite massive grossièrement grenue (24-OB-7027-A); B) leuconorite à oxydes-apatite grossièrement grenue (24-OB-7028-A) ; C) bande de gabbronorite massive très grossière dans la leucogabbronorite (24-OB-7000-B) ; D) norite nelsonitique massive finement grenue (24-OB-7023-A) ; E) enclaves de gabbronorite finement grenue allongées dans la norite (24-OB-7039-A) ; F) zone de mylonite au sein de la leuconorite (24-OB-7019-B). (Abréviations : AP : Apatite ; BO : Biotite ; Hornblende ; MG : Magnétite ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase).



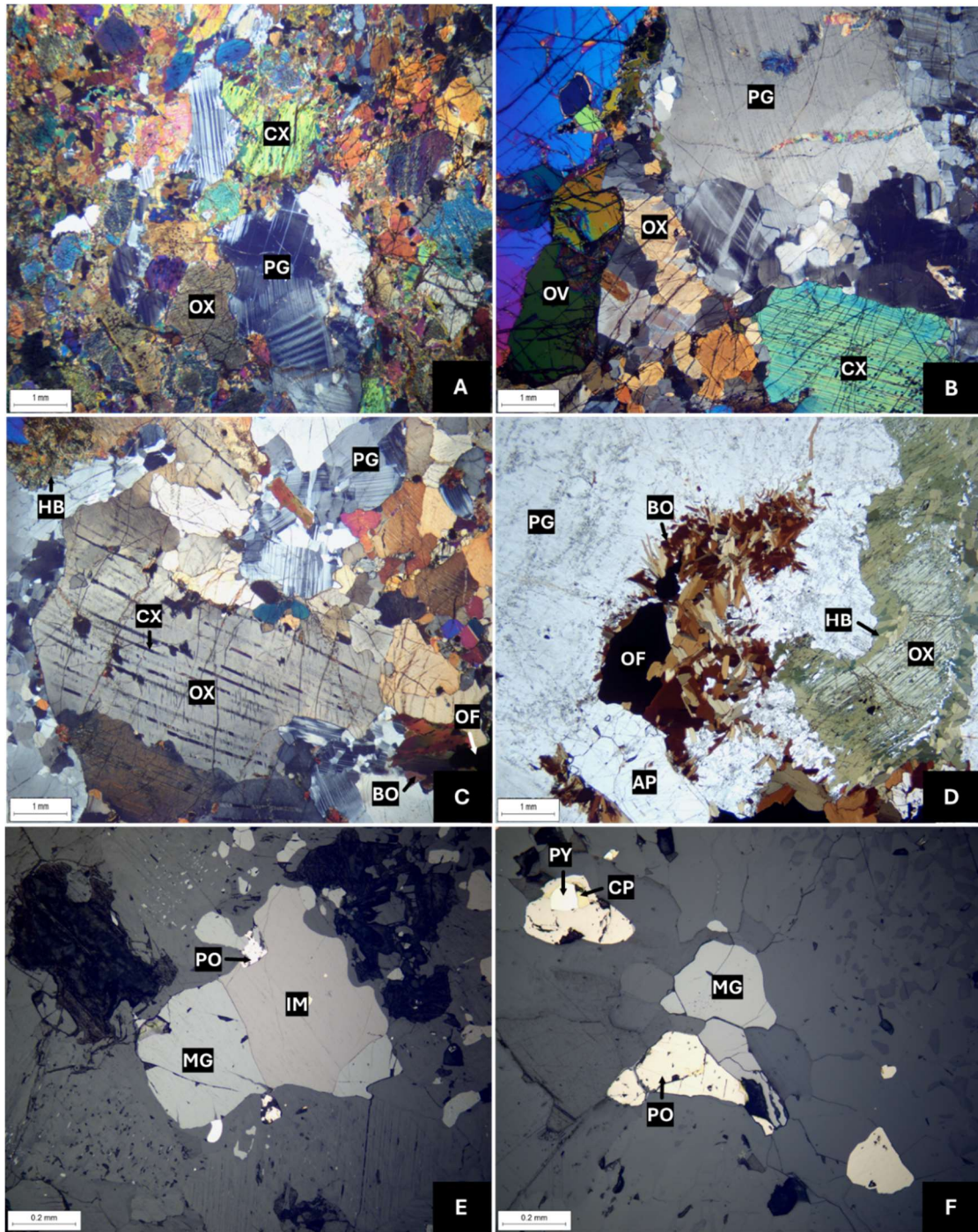


Figure 8 : Microphotographies de leuco(gabbro)norite de secteur d'étude. A) pyroxènes avec couronnes de hornblendes macles légèrement courbées dans les plagioclases dans leuconorite (LP ; 24-OB-7021-A) ; B) recristallisation de plagioclase dans gabbro-norite à oxydes-apatite (LP; 24-OB-7000-B) ; C) exsolutions de clinopyroxène dans orthopyroxène dans leuconorite (LP ; 24-OB-7016-A); D) couronnes de la hornblende autour d'orthopyroxène, et couronnes de biotite autour des oxydes de fer dans leuconorite (LN; 24-OB-7030-A); E) ilménite, la magnétite et la pyrrhotite dans gabbro-norite à oxydes-apatite (LR; 24-OB-7000-B) ; F) grain de pyrite et chalcopysite dans la pyrrhotite, ainsi que la magnétite dans leuconorite (LR; 24-OB-7035-A). (Abréviations : AP : Apatite ; Bo : Biotite ; CP : Chalcopysite ; CX : Clinopyroxène ; IM : ilménite ; HB : Hornblende ; OF : Oxydes de fer ; OV : Olivine ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PN : Pentlandite ; PO : Pyrrhotite ; LN : lumière naturelle ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).

### 5.2.2. (Leuco)troctolite

La (leuco)troctolite est principalement présente aux alentours de l'indice Ni-Cu de Nourricier dans la partie SE et centrale de mPlsj3, ainsi que dans la partie NW du secteur d'étude (mPlsj2 ; Figure 4). Sur le terrain, elle se caractérise par une couleur violacée en surface fraîche et une couleur grisâtre à brun-rouillée en surface altérée (Figure 9). Sa granulométrie varie de moyenne à très grossière. Elle est généralement massive présentant une texture grenue, coronitique et localement mégacristique. Sa minéralogie est dominée par le plagioclase (20 à 75 %), de couleur violacé à grisâtre, variant de 1 mm à 10 cm, parfois recristallisé (Figure 10 A). Il présente parfois des macles courbées, et localement une extinction roulante. L'olivine représente entre 2 % (sous forme de reliques) et 30 %, sous forme de grains brun-verdâtres fracturés et faiblement serpentinisés ou iddingsitisés, mesurant de 1 à 5 cm. Elle est parfois entourée d'une double couronne, avec l'orthopyroxène (<1 %) dans la zone interne, et de la hornblende dans la zone externe (Figure 10 A).

L'apatite se présente en grains blanchâtre, parfois jaunâtre très fracturée allant de 1 mm à 8 cm. Elle représente généralement entre 0 à 3 % de la minéralogie des troctolites, mais peut localement atteindre 5 à 15 %, ce qui conduit à désigner ces lithologies comme des leuco/troctolites à oxydes-apatite (Figure 9 B), voire nelsonitique (15-20 % d'apatite ; Figure 9 C). L'ilménite représente entre 0 et 15 %, sous forme de grains allant de 1 mm à 2 cm (Figure 10 D), ainsi que sous forme d'exsolutions dans la magnétite (Figure 10 C). La magnétite est présente en proportions allant de 0 à 10 %, en grain de 1 mm à 3 cm. On observe également du spinelle verdâtre (<1 %), associé à la magnétite (Figure 10 C). Les sulfures sont en traces (1 – 2 %), principalement constitués de pyrrhotite, avec quelques petits grains de chalcopryrite et de rares exsolutions de pentlandite dans la pyrrhotite (Figure 10 E).

Lorsque l'olivine est détruite, il ne subsiste qu'un cœur d'olivine altérée entouré de couronnes d'hornblende ou entièrement remplacé par de la hornblende verte (1-20 %). La biotite (3-10 %) est généralement associée aux oxydes, formant des amas en bordure de ces derniers ou apparaissant dans les couronnes entourant les grains d'olivine (Figure 10 B). Des porphyroblastes centimétriques (1 à 1,5 cm) de grenat rose ont été



observés très localement sur le terrain. De rares grains xénomorphes de calcite (<1 %) sont également présents.

La foliation et linéation minérale observées dans les leucotroctolites de l'unité mPlsj2 sont essentiellement définies par l'alignement de la hornblende et la biotite, plus rarement par l'olivine. Des enclaves de gabbronorite à grains fins, de dimensions pouvant atteindre 30 cm × 2 m, parallèles à la foliation, ont été observées dans les leucotroctolites de cette unité (Figure 9 D).

Un affleurement de troctolite nelsonitique (24-OB-7051-A) semble être aligné avec une série d'indices de Fe-Ti-P (ex. N142984, Traverse, TraMan (Lac F), Lac (H) et Lac à Paul (Zone 1)) formant une bande NE-SW parallèle à une faille de chevauchement qui recoupe le secteur à cet endroit (Figure 4).

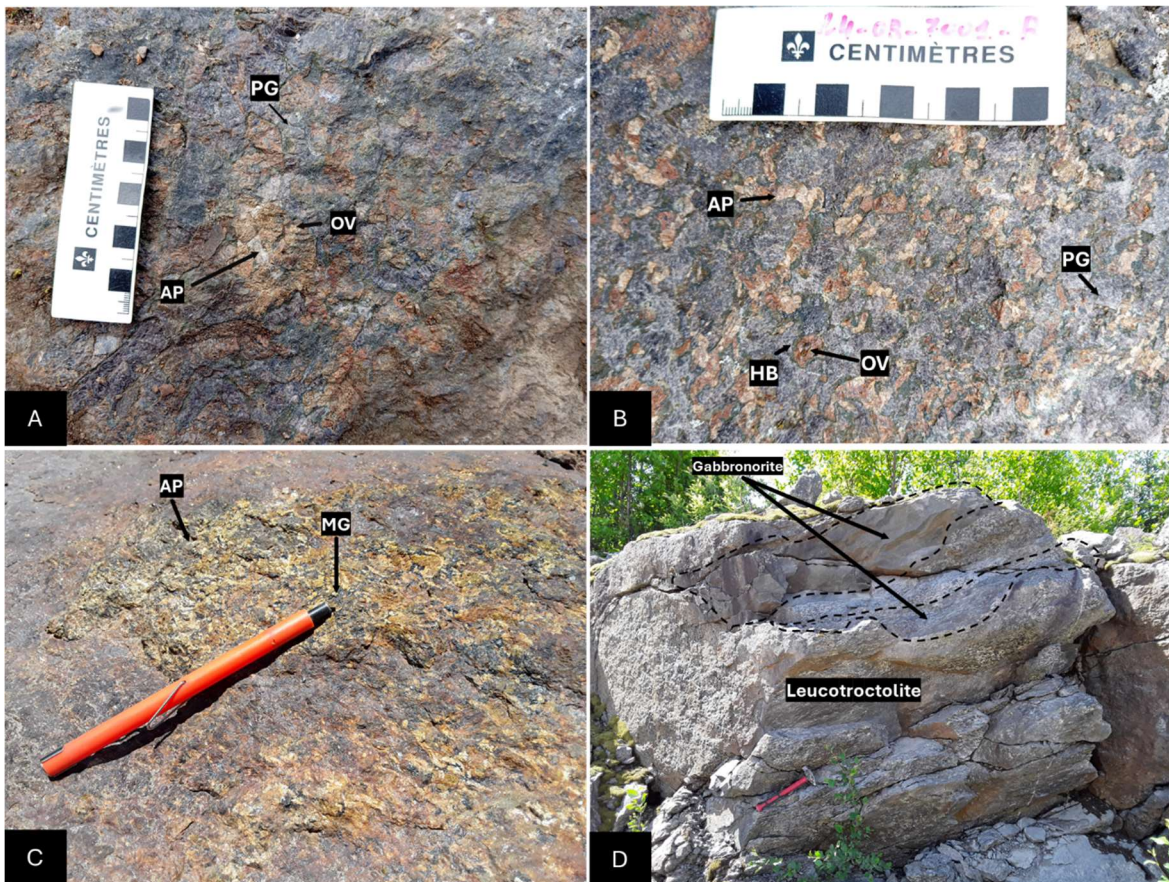


Figure 9 : Photographies de (leuco)troctolite du secteur d'étude. A) leucotroctolite massive grossièrement grenue (24-OB-7001-A1) ; B) leucotroctolite à oxydes-apatite montrant une texture coronitique (24-OB-7001-B) ; C) troctolite nelsonitique massive (24-OB-7051-A) ; D) enclaves de gabbronorite à grains fins dans la leucotroctolite foliée (24-OB-7055-A). (Abréviations : AP : Apatite ; HB : Hornblende ; MG : Magnétite ; OV : Olivine ; PG : Plagioclase).



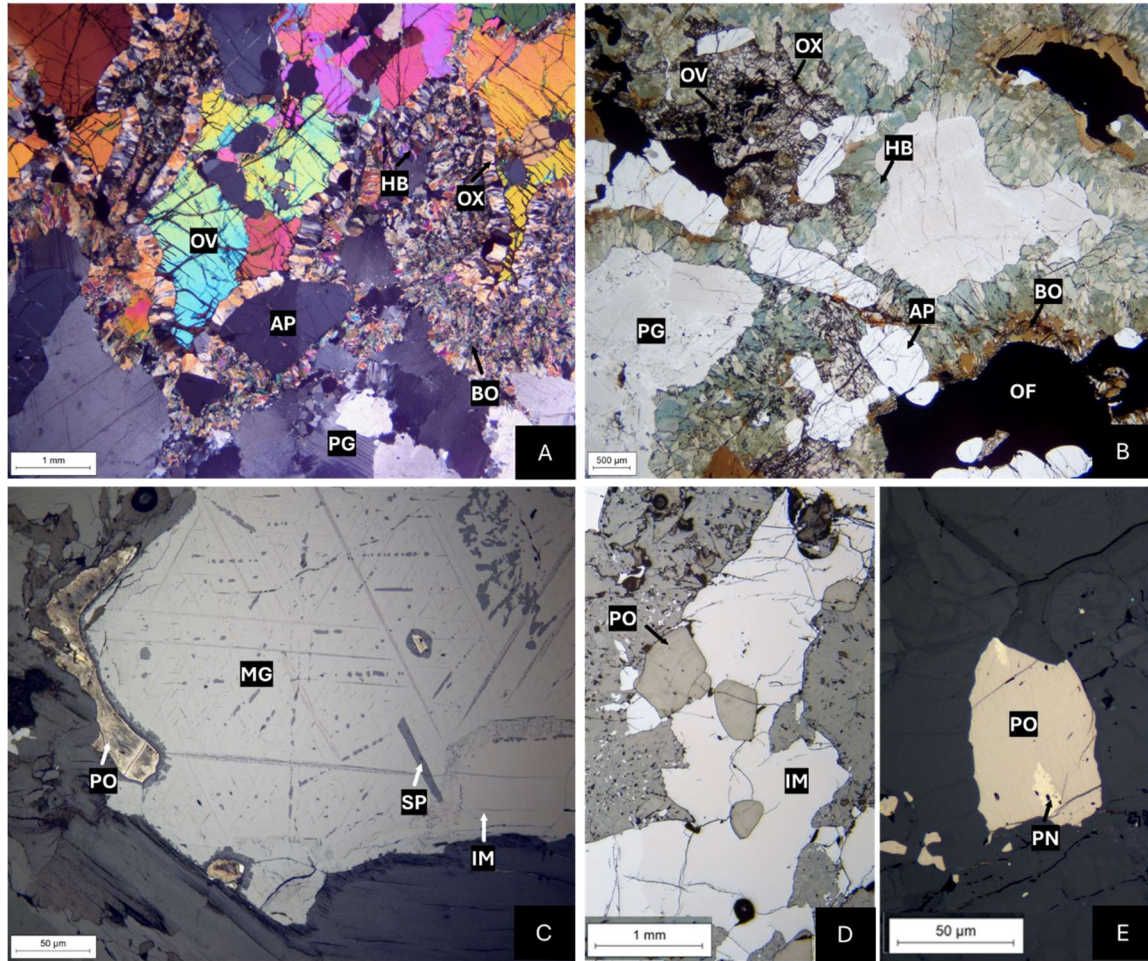


Figure 10 : Microphotographies de la (leuco)troctolite du secteur d'étude. A) leucotroctolite montrant plagioclase avec bordures localement recrystallisées avec macles légèrement courbées, ainsi que la double couronne de biotite/hornblende et d'orthopyroxène autour de l'olivine (LP ; 24-OB-7001-B). B) leucotroctolite coronitique avec olivine avec des couronnes de hornblende/biotite et d'orthopyroxène, ainsi que la biotite sous forme d'amas autour des oxydes de fer (LP ; 24-OB-7001-C). C) exsolution de spinelle et d'ilménite dans la magnétite dans troctolite nelsonitique (LR ; 24-OB-7051-A). D) ilménite avec grain de pyrrhotite dans troctolite nelsonitique (LR ; 24-OB-7001-C). E) exsolution de la pentlandite dans la pyrrhotite dans leucotroctolite à oxydes-apatite (LR ; 24-OB-7001-B). (Abréviations : AP : Apatite ; BO : Biotite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; OF : Oxydes de fer ; OV : Olivine ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PN : Pentlandite ; PO : Pyrrhotite ; SP : Spinelle ; LN : lumière naturelle ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).

### 5.2.3. Anorthosite

L'anorthosite a été observée dans trois affleurements de mPlsj3 (Figure 4). Elle se caractérise par une couleur violacée en surface fraîche et une couleur beige violacé à gris rouille en surface altérée (Figure 11 A). L'anorthosite est généralement homogène, présente une granulométrie grossière à très grossière, et est généralement massive et grenue. Sa minéralogie est dominée par le plagioclase (90 à 93 %), sous forme de grains de 0,5 à 3 cm, montrant une extinction roulante et des contacts dentelés entre eux, parfois accompagnés

d'un début de texture en mortier aux bordures (Figure 11 B). L'olivine, de couleur verdâtre, représente entre 0 et 1 %, en grains de 1 à 6 mm, transformés au niveau des bordures ou totalement en hornblende verte (Figure 11 C). L'apatite, blanche à jaunâtre et fracturée est présente à moins de 1 %, sous forme de grains subarrondis de 1 à 3 mm (Figure 11 C). L'ilménite et la magnétite varient entre 0 et 2 %, avec des tailles comprises entre 1 et 8 mm. Les sulfures sont en traces et constitués principalement de pyrrhotite (1 à 2 %), fracturée et altérée en magnétite, avec traces de pentlandite (Figure 11 D). La chalcopryrite (1 %), xénomorphe, forme des amas irréguliers au sein de la pyrrhotite, et de rares grains xénomorphes de pyrite (<1 %) sont également observés. La hornblende verte (1-2 %) forme des couronnes autour des reliques d'olivine et, dans certains cas, remplace totalement cette dernière. La biotite (2 %) se présente en amas autour des oxydes (Figure 11 C).

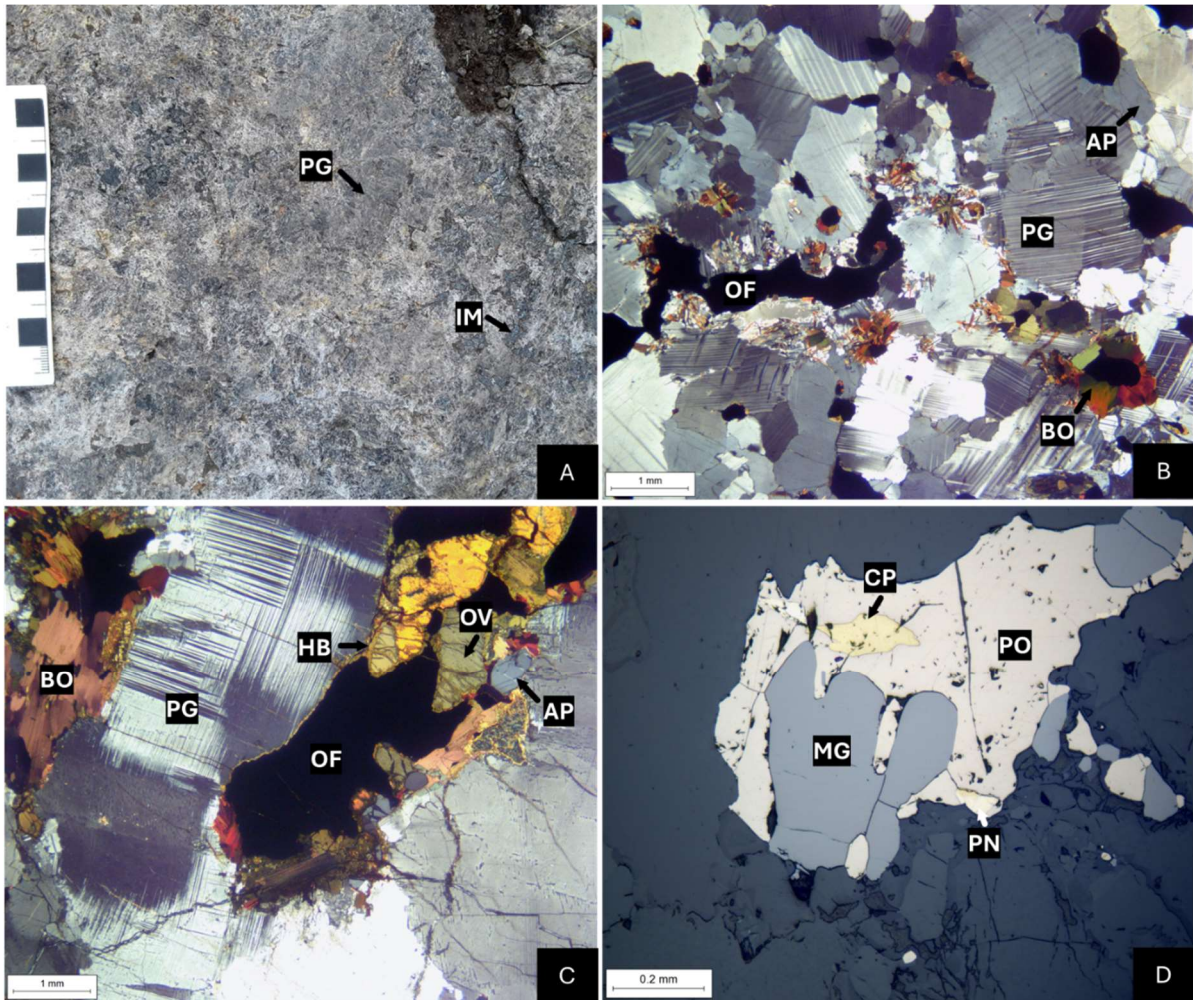


Figure 11 : Photographies de l'anorthosite massive grossièrement grenue de secteur d'étude. A) aspect général de l'anorthosite massive grossièrement grenue en surface altérée (24-OB-7048-A); B) anorthosite montrant des macles polysynthétiques légèrement courbées, avec bordures dentelées, ainsi que la biotite sous forme d'amas autour des oxydes de fer (LP ; 24-OB-7008-A) ; C) couronnes de hornblende autour d'olivine dans anorthosite (LP ; 24-OB-7008-A) ; D) petits amas de chalcopyrite et pentlandite dans la pyrrhotite associée à des grains de la magnétite (LR ; 24-OB-7008-A). (Abréviations : AP : Apatite ; Bo : Biotite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; OF : Oxydes de fer ; OV : Olivine ; PG : Plagioclase ; PN : Pentlandite ; PO : Pyrrhotite ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).

#### 5.2.4. Webstérite

*La webstérite* a été observée que sur un affleurement (24-OB-7049-B ; Figure 4). Elle y apparaît comme une sous-lithologie en association avec une poche pegmatitique de leucogabbronorite (Figures 12 A et B) au sein d'un affleurement de leucogabbronorite de mPls3. Sur le terrain, la webstérite se distingue par sa couleur noirâtre. Elle est massive, avec une granulométrie grossière (Figure 12 B), et une texture cumulat (Figure 12 C). Sa composition minéralogique est composée principalement de clinopyroxène (~60 %) ainsi que d'orthopyroxène (~30 %) sous forme de grains idiomorphes à subidiomorphes de 1 à



2 cm. Les orthopyroxènes présentent parfois des exsolutions de clinopyroxène (Figure 12 C). Les pyroxènes sont très peu ou non altérés. Le plagioclase violacé constitue environ 2 %, sous forme de grains mesurant de 1 à 2 mm. La hornblende représente environ 2 % et se trouve en bordure des pyroxènes. L'apatite représente 1 %, en grains de 0,5 à 1 mm. La magnétite est présente en faible quantité (1 % ; Figure 12 D). Les sulfures sont également présents en faible quantité : la pyrrhotite constitue environ 2 % (Figure 12 E) et contient de très petites flammes de pentlandite (<1 %), ainsi que de petits grains ou amas xénomorphes de chalcoppyrite (1 % ; Figure 12 E).

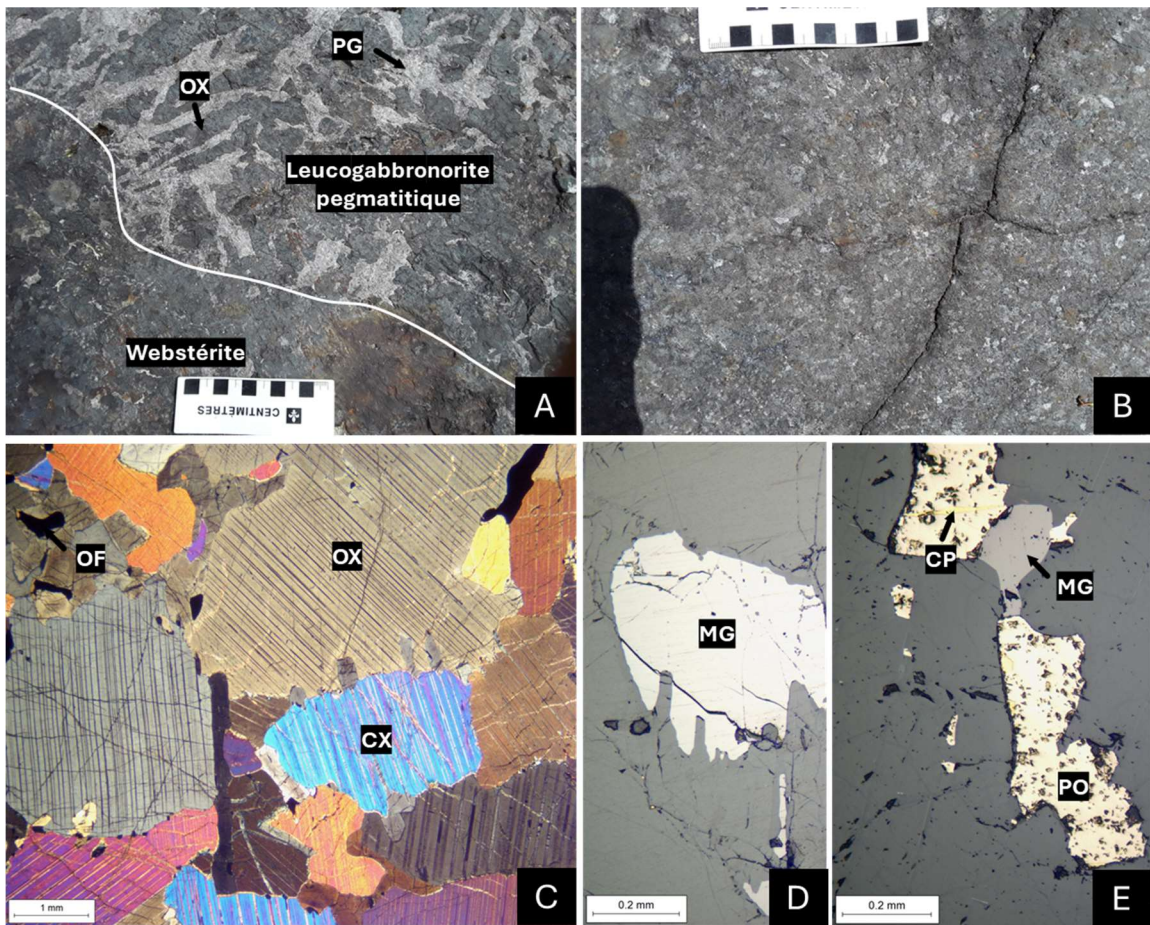


Figure 12 : Photographies de la webstérite de secteur d'étude. A) contact leucogabbropegmatite avec la webstérite massive grossièrement grenue ; B) webstérite massive grossièrement grenue (24-OB-7049-B) ; C) texture de cumulat de la webstérite (LP; 24-OB-7049-B) ; D) grain de magnétite dans webstérite (LR ; 24-OB-7049-B) ; E) pyrrhotite, la chalcoppyrite et la magnétite dans webstérite (LR ; 24-OB-7049-B). (Abréviations : CP : Chalcoppyrite ; CX : Clinopyroxène ; MG : Magnétite ; OF : Oxydes de fer ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).

### 5.2.5. Orthopyroxénite (dyke)

Un dyke d'orthopyroxénite a été observé sur un affleurement (24-OB-7032-B ; indice Léo-Charl ; Figure 4), recoupant la norite massive de la mPlsj3 (Figures 13 A et B). Au cœur du dyke, une minéralisation semi-massive de sulfures est présente (voir la partie de la minéralisation Ni-Cu de Léo-Charl). L'épaisseur du dyke varie de 10 à 20 cm, et son orientation est de 009/44°.

L'orthopyroxénite est caractérisée par une couleur noirâtre en surfaces altérée et fraîche (Figure 13 B). Sa granulométrie est grossière, et elle présente une structure massive ainsi qu'une texture grenue. Elle est principalement composée d'orthopyroxène (60 %), mesurant entre 0,2 et 1,5 cm, fortement remplacé par la hornblende (Figure 13 C). Le clinopyroxène (20 %), est hypidiomorphe à xénomorphe, avec un remplacement par de la hornblende très marqué le long des clivages et des fractures. Bien que la proportion modale de clinopyroxène observée en lame mince corresponde davantage à une webstérite, la signature géochimique (éléments majeurs et terres rares ; voir section géochimie) est typique d'une orthopyroxénite. La proportion élevée de clinopyroxène pourrait résulter d'une hétérogénéité localement enrichie en clinopyroxène, et donc non représentative de l'ensemble de la roche. La hornblende verte (15 %) est omniprésente autour des pyroxènes et dans les clivages et les fractures des pyroxènes. L'apatite (1 %) se présente sous forme de petits grains subarrondis, fracturés, mesurant de 1 à 3 mm (Figure 13 C). L'ilménite et la magnétite sont présentes en grains, avec une dominance de la magnétite (4 % ; Figure 13 D) par rapport à l'ilménite (1 %). La magnétite est associée à la pyrrhotite et semble la remplacer. La chalcopryrite (2 %) est présente sous forme de grains xénomorphes, subarrondis à allongés, essentiellement entourés en bordure par la pyrrhotite (Figure 13 D). Elle se manifeste également sous forme de petites veinules irrégulières recoupant les pyroxènes, ou sous forme de petits amas et de veinules dans la magnétite. La pyrrhotite représente 1 % et se trouve soit en bordure de la chalcopryrite, soit sous forme de grains



isolés contenant des amas de chalcoppyrite ou de magnétite. Aucune trace de pentlandite n'a été observée en lame mince.

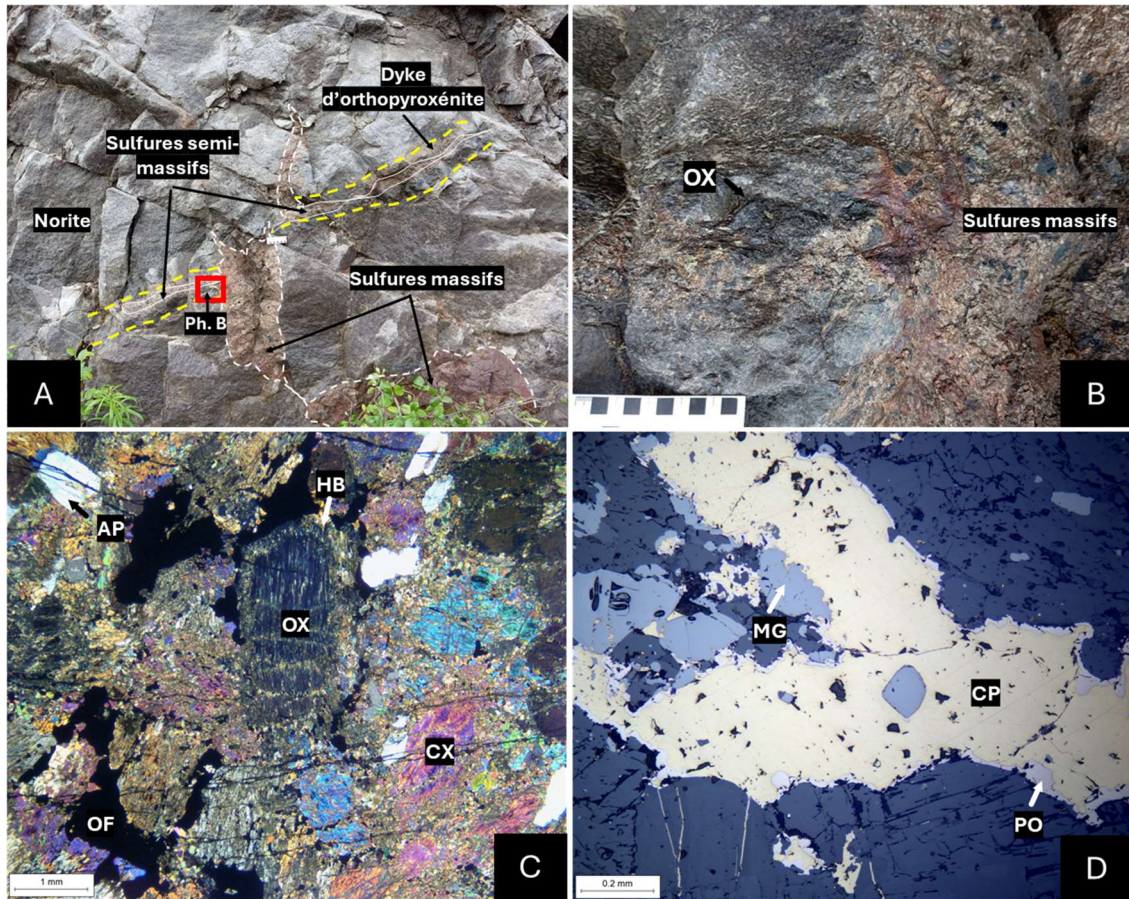


Figure 13 : Photographies du dyke d'orthopyroxénite dans le secteur de Léo-Charl. A) dyke d'orthopyroxénite recoupe la norite (24-OB-7032-B) ; B) vue rapprochée sur l'orthopyroxénite massive grossièrement grenue (24-OB-7032-B) ; C) altération des orthopyroxène en hornblende (LP; 24-OB-7032-B) ; D) pyrrhotite autour de la chalcoppyrite, et la magnétite (LR ; 24-OB-7032-B). (Abréviations : CP : Chalcoppyrite ; CX : Clinopyroxène ; MG : Magnétite ; OF : Oxydes de fer ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; Ph.B : Photo B ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).

### 5.2.6. (Gabbro)norite nelsonitique

La *(gabbro)norite nelsonitique* du secteur d'étude se présente sous forme d'une bande encaissée dans la leucogabbro-norite au niveau de l'indice de MHY (Figures 14 A et B) et sous forme d'une poche la norite autour de l'indice de Léo-Charl (Figures 14 C et D). En surface altérée, elle a une couleur noirâtre à blanchâtre, tandis qu'en surface fraîche, elle est noire. Elle se caractérise par une granulométrie grossière à très grossière et une texture variant de mégacristique à pegmatitique. D'un point de vue minéralogique, la

(gabbro)norite nelsonitique est principalement composée d'apatite (30 à 40 %), sous forme de grains subarrondis et fracturés (Figure 14 E), variant de 1 mm à 5 cm, parfois en inclusion dans les oxydes. La magnétite présente environ 10 à 25 % sous forme de grains subidiomorphes à xénomorphes mesurant entre 2 mm et 3 cm. Elle contient du spinelle, soit sous forme de grains verdâtres (2 %), soit sous forme d'exsolutions (Figure 14 F). L'ilménite représente 10 à 20 %, sous forme de grains isolés ou en exsolution dans la magnétite (Figure 14 F).

Dans la norite nelsonitique, présente sous forme de poches dans la norite, l'orthopyroxène constitue 15 % de la roche et présente des exsolutions de clinopyroxène. Le clinopyroxène et le plagioclase sont également présents, chacun représentant 5 %. Dans la gabbro-norite nelsonitique, observée sous forme de bandes dans la leucogabbro-norite, le clinopyroxène représente 15 %, l'olivine 10 %, l'orthopyroxène 5 %, tandis que le plagioclase est peu abondant (<5 %) et se présente sous forme de petits grains plus ou moins recristallisés. Les minéraux secondaires incluent la biotite, qui se présente sous forme d'amas au contact des oxydes, et la hornblende (jusqu'à 5 %).

Les sulfures sont présents en faibles proportions, principalement la pyrrhotite (1 %), avec une quantité négligeable de pentlandite (<1 %) sous forme de flammes. La chalcopyrite est présente en petits grains dans la pyrrhotite (<1 %).



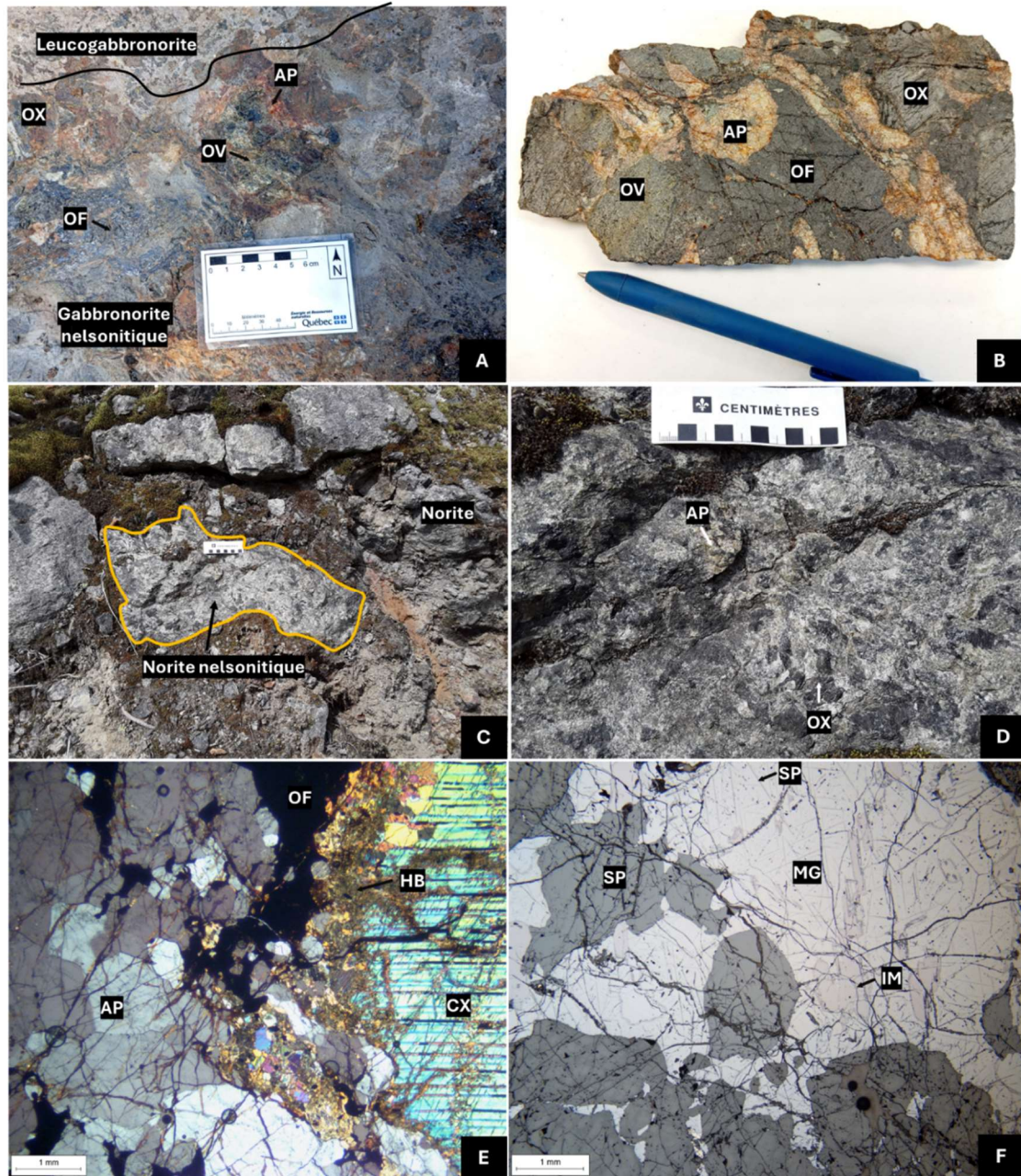


Figure 14: Photographies de (gabbro)nelsonitique. A) bande de la gabbronorite nelsonitique dans la leucogabbronorite (24-OB-7000-C) ; B) texture mégacristique de la gabbronorite nelsonitique ; C) poche de norite nelsonitique pegmatitique au sein de la norite (24-OB-7033-C) ; D) texture pegmatitique de norite nelsonitique (24-OB-7033-C) ; E) couronne de hornblende autour de clinopyroxène, ainsi que l'apatite fracturée et les oxydes de fer dans gabbronorite nelsonitique (LP ; 24-OB-7000-C) ; F) exsolution de spinelle et d'ilménite dans la magnétite dans norite nelsonitique (LR ; 24-OB-7033-C). (Abréviations : AP : Apatite ; CX : Clinopyroxène ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; OF : Oxydes de fer ; OV : Olivine ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; SP : Spinelle ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).



#### 5.2.7. (Leuco)gabbronorite de Steve (gabbro de Steve ; mPlsj6)

Sur le terrain, la (*leuco*)gabbronorite de Steve a été observée dans la partie Est de la zone d'étude. Cette lithologie appartient à l'unité mPlsj6 (Hébert et al., 2009), qui s'étend sur une superficie d'environ 150 km<sup>2</sup> et forme une masse arrondie importante, bien délimitée par une signature magnétique subcirculaire concentrique (Figure 4).

La (leuco)gabbronorite de Steve présente une variation de couleur allant du grisâtre au beige en surface altérée et noirâtre en surface fraîche. La granulométrie varie de moyennement à finement grenue (Figure 15 B). En termes de minéralogie, elle est composée de 35 à 60 % de plagioclase beige-blanchâtre, allongé, subidiomorphe, parfois à extinction roulante mesurant de 1 à 5 mm. La roche contient également de 5 à 20 % de clinopyroxène verdâtre, subidiomorphe, mesurant généralement entre 0,5 et 2 mm. On y trouve également 2 à 10 % d'orthopyroxène brunâtre (0,5 et 2 mm ; Figure 15 C), ainsi que 1 à 5 % de magnétite (0,5-1 mm) et 1 % d'hémo-ilménite (ilménite gris foncé renfermant des exsolutions d'hématite lamellaire gris pâle ; Figures 15 E et G). La pyrrhotite est présente en proportion inférieure à 1 % incluant de petits grains de chalcopyrite (Figure 15 F).

La (leuco)gabbronorite de Steve présente également une proportion notable d'hornblende (jusqu'à 25 %) et de biotite (jusqu'à 15 %). Ces minéraux forment des couronnes autour des pyroxènes, les remplaçant parfois totalement (Figure 15 D).

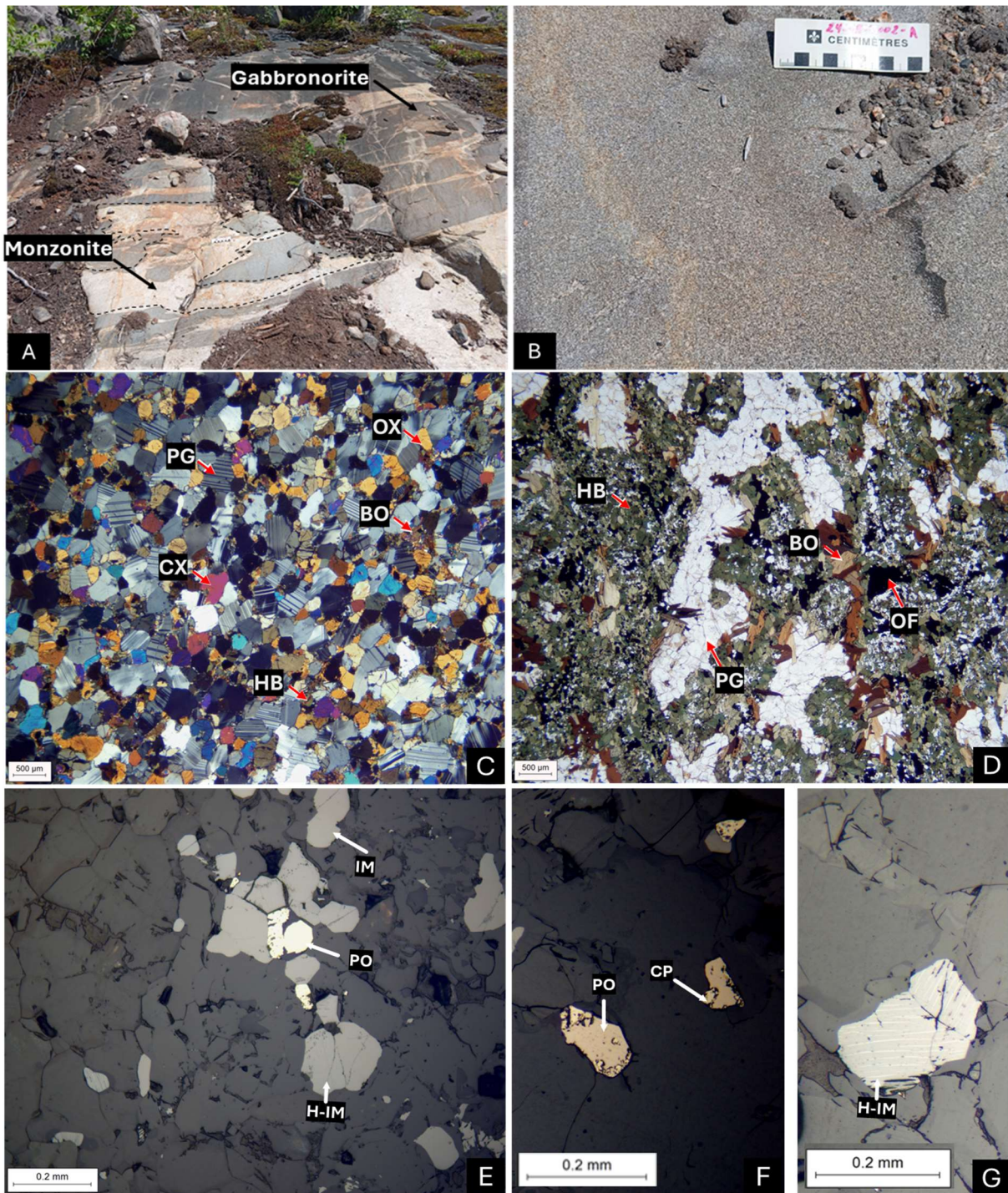


Figure 15: Photographies de la (leuco)gabbro de Steve « gabbro de Steve ». A) vue générale des différentes lithologies (24-OB-7002) ; B) aspect typique de gabbro de Steve en surface altérée ; C) la minéralogie primaire de leucogabbro de Steve (LP ; 24-OB-7002-A) ; D) remplacement total des pyroxènes par hornblende et biotite dans gabbro de Steve (LP ; 24-OB-7007-A) ; E) pyrrhotite l'ilménite, et l'hémo-ilménite dans leucogabbro de Steve (LR ; 24-OB-7002-A) ; F) pyrrhotite et la chalcoppyrite dans leucogabbro de Steve (LR ; 24-OB-7002-A) ; G) exsolution de l'hématite dans l'ilménite dans leucogabbro de Steve (LR ; 24-OB-7002-A). (Abréviations : Bo : Biotite ; CP : Chalcoppyrite ; CX : Clinopyroxène ; H-IM : Hémo-ilménite ; HB : Hornblende ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; LN : lumière naturelle ; LP : lumière polarisée double ; LR : lumière réfléchie).



La foliation dans la (leuco)gabbro norite de Steve est définie par l'alignement des minéraux mafiques. Cette lithologie se caractérise également par la présence d'enclaves de leuconorite, d'anorthosite (jusqu'à 1 m x 40 cm), ainsi que des enclaves plurimétriques (jusqu'à 5 x 3 m) de gneiss charnockitique fortement déformés (Figure 16 B). De plus, des injections de monzonite déformées, d'une épaisseur allant jusqu'à 50 cm, ont été observées au sein de la (leuco)gabbro norite de Steve (Figure 16 C). L'unité est également recoupée par diverses injections tardives, notamment des dykes de granite plus ou moins déformés (Figure 16 D).

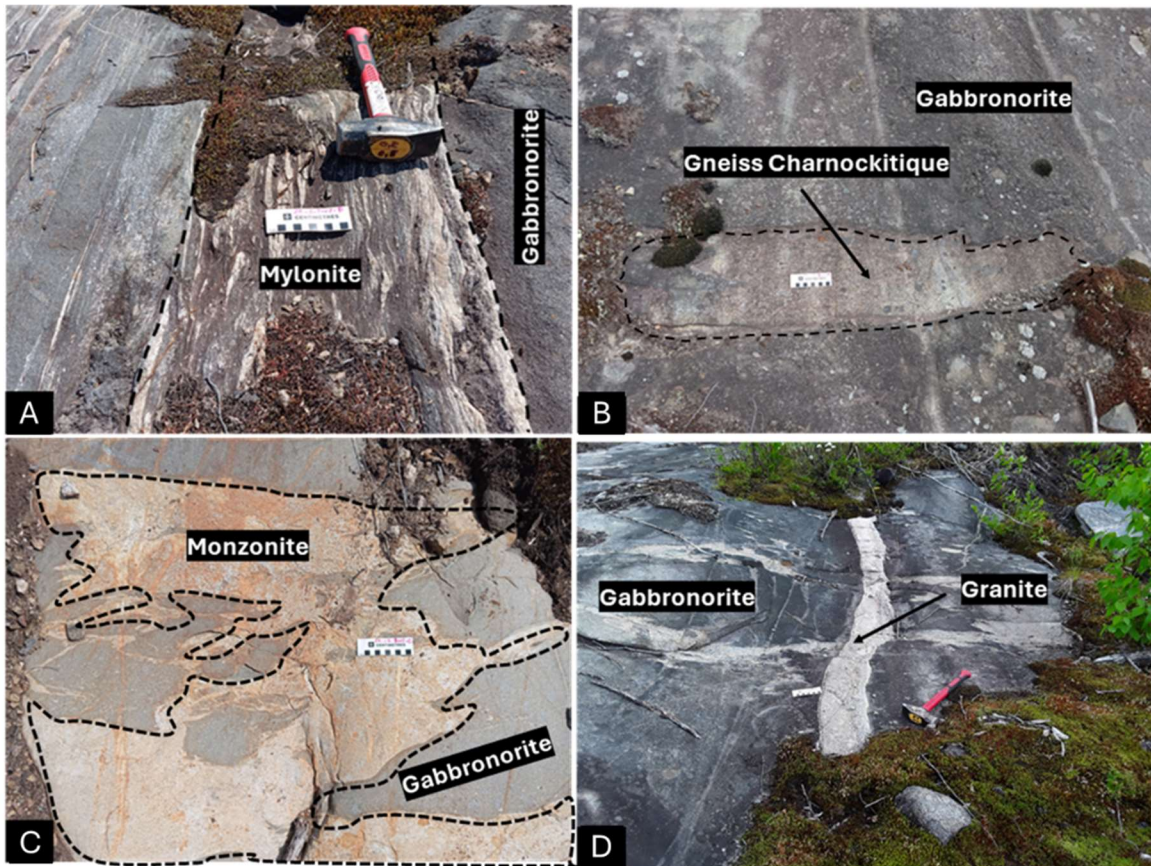


Figure 16: Photographies des lithologies du « gabbro de Steve ». A) une enclave d'orthogneiss charnockitique au sein de la microgabbro norite ; D) des injections de monzonite déformées dans la microgabbro norite ; E) une zone mylonitique locale au sein de la microgabbro norite ; F) dyke de granite recoupe la microgabbro norite.

## 5.2.8. Unités tardives

### 5.2.8.1. Granite à feldspath alcalin

Le *granite à feldspath alcalin* a été observé sous forme de petites intrusions ou dykes dans les lithologies de la SALSJ. Il se distingue par une couleur rose blanchâtre, aussi bien en surface fraîche qu'altérée (Figure 17). Sa granulométrie varie de grossière à très grossière, et sa texture est graphique à porphyrique, parfois pegmatitique. Sa composition minéralogique comprend de 60 à 80 % de feldspath potassique rose, sub-idiomorphe, mesurant entre 2 et 5 cm, de 15 à 30 % de quartz gris, xénomorphe, mesurant jusqu'à 5 mm, et de 2 à 5 % de biotite brune en feuillets mesurant jusqu'à 1 cm.



Figure 17 : Photographie de granite à feldspath alcalin du secteur. A) vue générale montrant la texture graphique (24-OB-7018-A); B) vue proche montrant la texture graphique (24-OB-7018-A). (Abréviations : BO : Biotite ; FK : Feldspath potassique ; QZ : Quartz).

### 5.2.9. Minéralisation Ni-Cu de l'indice de Léo-Charl

Le seul endroit où la minéralisation est observée en surface était au niveau de l'indice Ni-Cu de Léo-Charl. Cette minéralisation a été observée le long du Chemin des Chutes-des-Passes, au km 174, avec une bonne exposition des deux côtés de la route.

Dans l'indice de Léo-Charl on observe une gradation de minéralisation sulfurée de massive à semi-massive du côté sud de la route, associé au dyke d'orthopyroxénite. Cependant, du côté nord de la route, la minéralisation est essentiellement massive à semi-massive, et localement disséminée dans la norite hôte. Dans ce rapport, la minéralisation

en Ni-Cu est considérée comme disséminée lorsque la proportion de sulfures est comprise entre 5 et 20 %, semi-massive entre 20 et 80 %, et massive lorsque la proportion dépasse 80 %.

Du côté sud de la route, la minéralisation massive de Léo-Charl est associée à un dyke d'orthopyroxénite recoupant la norite grossièrement litée de mPlsj3, ainsi qu'en amas connecté aux sulfures du dyke, mais dans la norite (Figures 18 A et B). Les amas sulfurés mesurent de 2 à 30 cm de large sur 70 cm à 1,5 m de long (Figure 18 A). Ils présentent une couleur brune rouillée en surface altérée et brune-rosée en surface fraîche (Figure 18 C). La granulométrie varie de moyennement grenue à grossièrement grenue. Ils sont en contact net avec la norite encaissante et sont connectés au cœur du dyke composé également de sulfures semi-massifs et semble suivre et s'amasser le long de fractures qui décalent le dyke d'orthopyroxénite localement (Figure 18 B). Du côté nord de la route, la minéralisation en sulfures massifs est encaissée dans la norite massive à pegmatitique du secteur, sous forme d'un amas. La qualité de l'affleurement ne permettait aucune estimation des dimensions de l'amas. Les sulfures massifs sont composés de pyrrhotite très grossièrement grenue, traversée par des fractures de largeur millimétrique remplies de chalcopryrite (Figure 18 D).

De façon général, les amas de *sulfures massifs* de Léo-Charl sont composés de 75 à 80 % de pyrrhotite qui forme la matrice pour les autres minéraux sulfurés ainsi que pour les phases silicatées. Elle apparaît sous forme de masses xénomorphes et est parfois très fracturée, remplacée par la magnétite au niveau des fractures (Figure 19 A et C). La chalcopryrite, présente en proportion de 2 à 10 %, se présente sous forme de grains xénomorphes, essentiellement concentrés en bordure de la pyrrhotite (Figure 19 A et C), ainsi que sous forme de veinules irrégulières recoupant la pyrrhotite. Sur le terrain, elle est observée entourant la pyrite sous forme de couronnes de 0,5 mm. L'abondance de la pentlandite varie entre 1 et 2 %, et son association avec la pyrrhotite est systématique. Elle s'y présente sous forme d'exsolutions en petites flammes ou de très petits amas xénomorphes dans la pyrrhotite (Figures 19 B et D). Jusqu'à 2 % de pyrite idiomorphe, de 3 à 12 mm, a été observée sur le terrain. Dans le côté sud de la route, ces amas contiennent des fragments (ou porphyroclastes) de pyroxène (5 à 10 %), subangulaires, mesurant de 0,5 à 3 cm, ainsi que 3 à 5 % de plagioclase violacé subarrondi, dont la taille varie entre

0,5 et 1 cm (Figure 18 E). Du côté nord, seule la hornblende (10 %) constitue la phase silicatée de ces minéralisations.

La minéralisation *semi-massive* se trouve principalement au cœur du dyke d'orthopyroxénite sur une épaisseur de 2 à 5 cm et est d'une couleur allant du bronze jaune à un brun légèrement doré (Figure 18 E). La granulométrie des sulfures est finement à grossièrement grenue. La minéralisation est principalement composée de 35 % de pyrrhotite, qui apparaît sous forme de masses xénomorphes et fracturées (Figure 20 C), contenant de petits grains subarrondis de magnétite (1 %), ainsi que de petits amas xénomorphes ou veinules de chalcopryrite (5 % ; Figure 20 D). La pentlandite (2 %) est présente sous forme d'exsolutions en flammes dans la pyrrhotite (Figure 20 D). La pyrite (2 %) est observée en affleurement.

La matrice silicatée est composée de 40 % d'orthopyroxène et de 15 % de clinopyroxène sub-idiomorphe à xénomorphe, partiellement remplacé par de la hornblende (Figure 20 A). La hornblende (2 % ; Figure 20 B) et la biotite (1 %) se présentent sous forme de couronnes autour des pyroxènes et dans les fractures ainsi que les plans de clivage de ces derniers.

Au côté sud de la route, la *minéralisation disséminée/en filet* est observée vers les épontes du dyke d'orthopyroxénite sur une distance de 5 cm, et évolue vers une texture semi-massive au cœur de dyke. Du côté nord de la route, on trouve une zone de ~2 m de minéralisation d'environ 10 % de pyrrhotite disséminée dans l'encaissant noritique à proximité de la minéralisation massive (Figure 18 F). La pyrrhotite y est fracturée, altérée au niveau des fractures en magnétite (Figure 21 C et D), avec des exsolutions en petites flammes de pentlandite (<1 %) et 2 % de chalcopryrite (Figure 21 C). On trouve également de la magnétite (2 %), en grains bordés de pyrrhotite, contenant parfois des grains ou des exsolutions d'ilménite (1 % ; Figure 21 D). La matrice silicatée est majoritairement composée de plagioclase (45 %), très séricitisé (Figure 21 B). Les pyroxènes sont totalement remplacés par la hornblende (environ 25 % ; Figure 21 A) et en biotite (2 %).



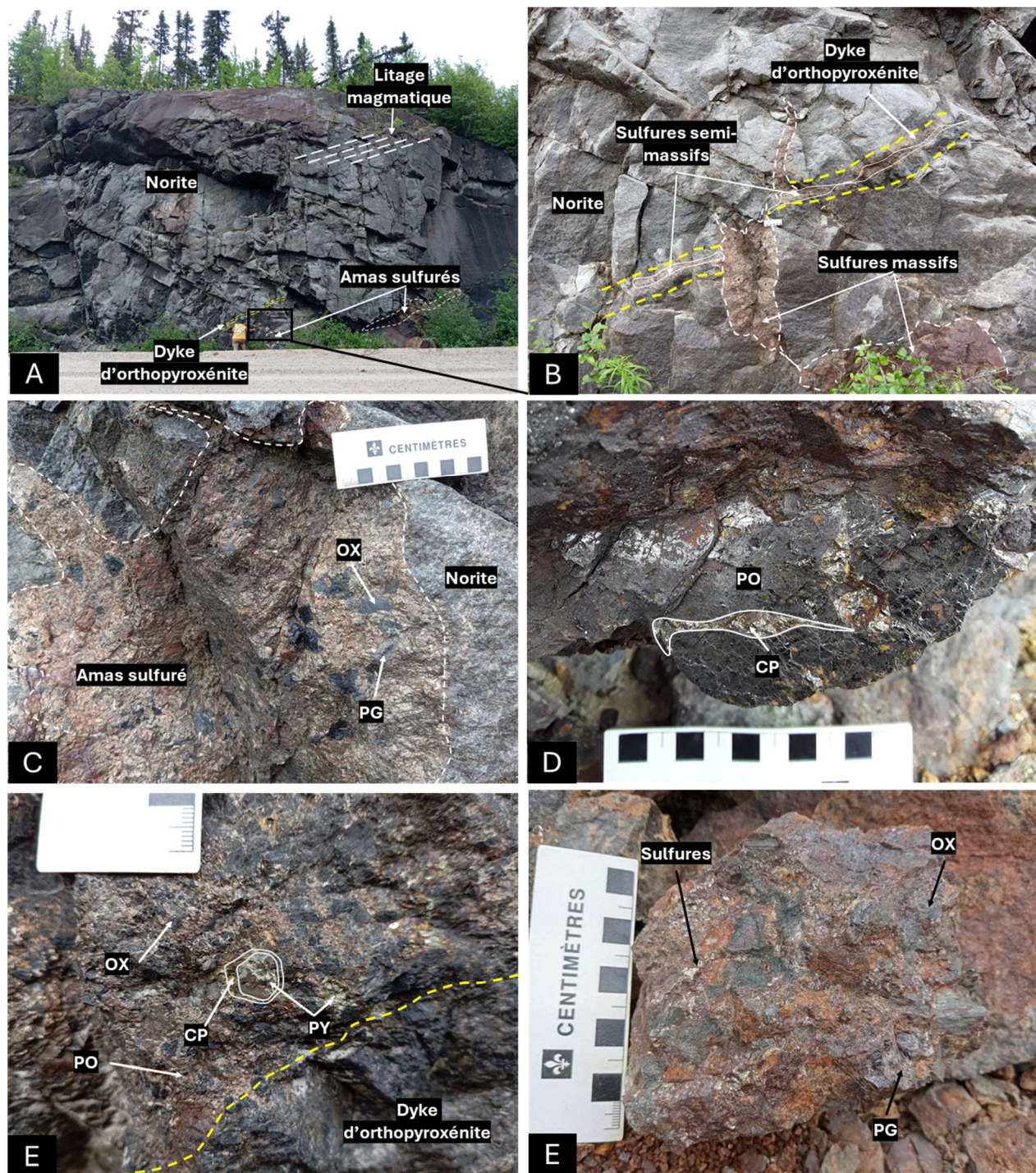


Figure 18 : Photographies des minéralisations sulfurées de l'indice de Léo-Charl. A) Vue générale de l'affleurement montrant le litage de la norite, le dyke et les amas (24-OB-7032). B) relation entre le dyke d'orthopyroxénite, la norite, et les sulfures massifs et semi-massifs du côté sud de la route. C) contact net entre la norite et l'amas sulfuré, avec des porphyroclastes d'orthopyroxène et de plagioclase. D) minéralisation massive du côté sud de la route, avec la chalcopyrite qui remplit les fractures de pyrrhotite. E) Minéralisation semi-massive au cœur du dyke d'orthopyroxénite. F) minéralisation disséminée dans la norite du côté nord de la route (24-OB-7033-B2). (Abréviations : OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; CP : Chalcopyrite ; PY : Pyrite).



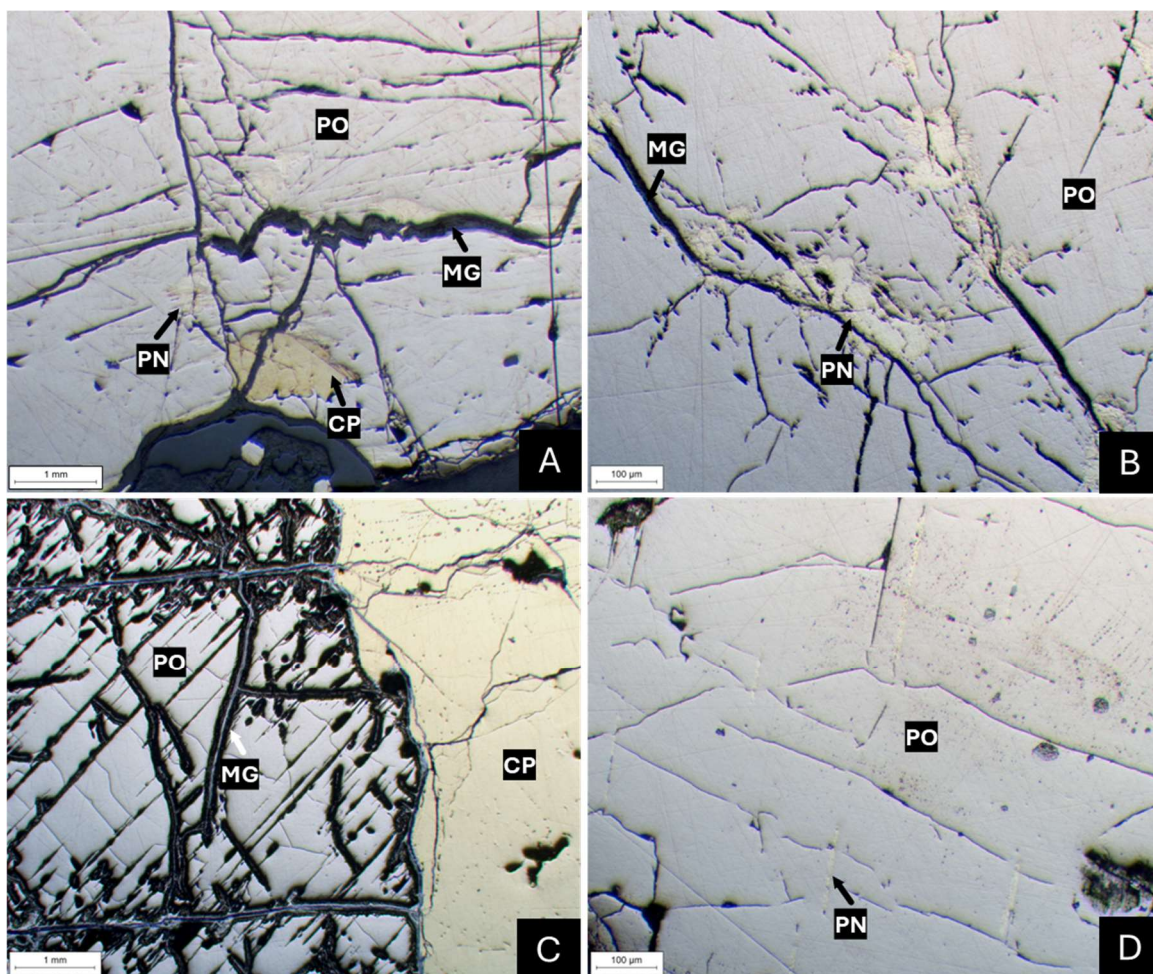


Figure 19: Microphotographie en LR de la minéralisation massive. A) amas de chalcopyrite dans la pyrrhotite, côté sud de la route (24-OB-7032-C2) ; B) exsolutions de pentlandite dans la pyrrhotite, côté sud de la route (24-OB-7032-C2) ; C) pyrrhotite fracturée, altérée en magnétite au niveau des fractures, ainsi que la chalcopyrite, côté nord de la route (24-OB-7033-B1) ; D) exsolutions de pentlandite dans la pyrrhotite, côté nord de la route (24-OB-7033-B1). (Abréviations : CP : Chalcopyrite; MG : Magnétite ; PN : Pentlandite ; PO : Pyrrhotite ; LR : Lumière réfléchie.)

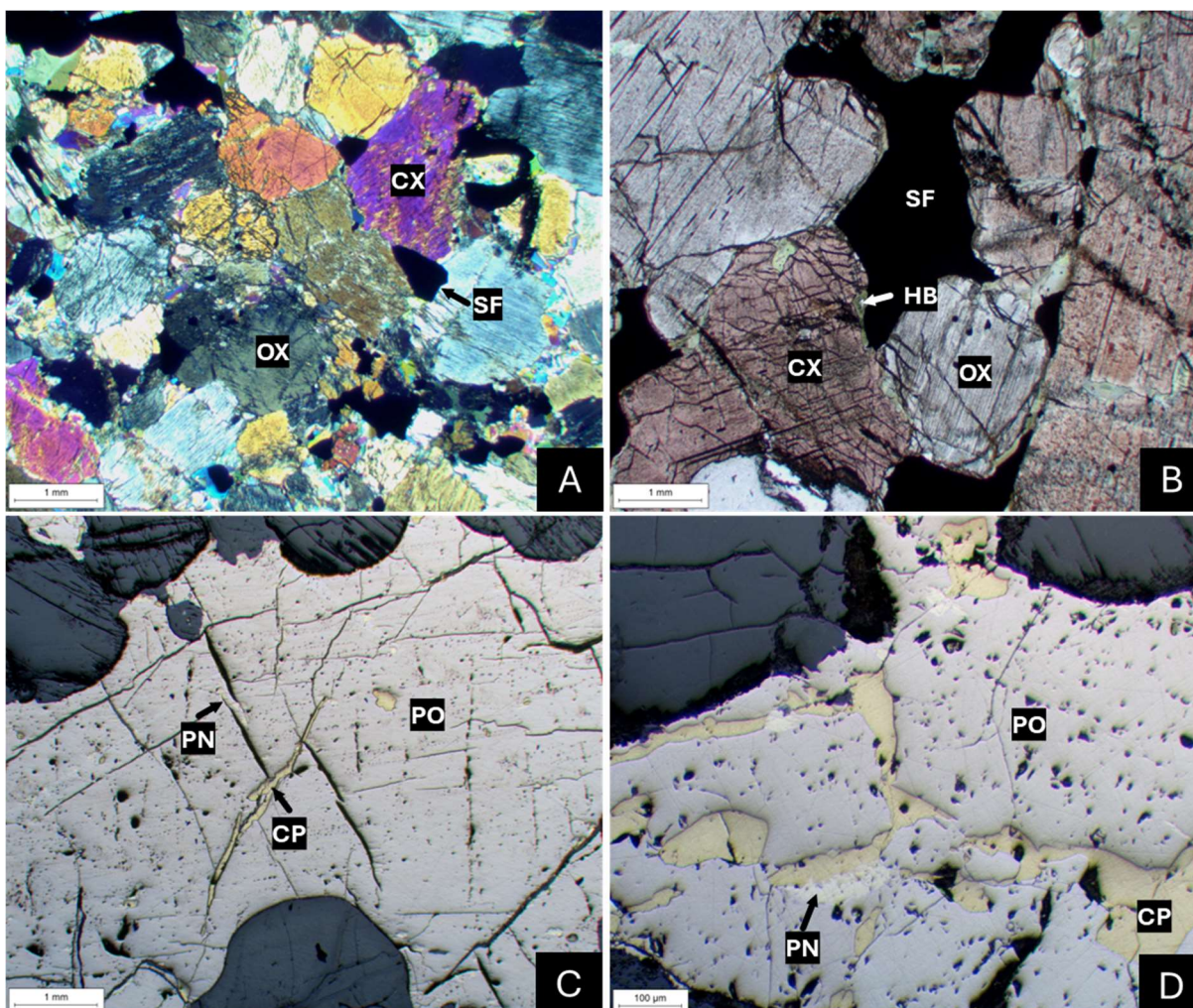


Figure 20: Microphotographie de la minéralisation semi-massive. A) phase silicatée de la minéralisation semi-massive (orthopyroxène et clinopyroxène) (LP; 24-OB-7032-C1) ; B) fines couronnes d'hornblende autour des pyroxènes (LN; 24-OB-7032-C1) ; C) amas de chalcopyrite dans la pyrrhotite fracturée (LR; 24-OB-7032-C1) ; D) exsolutions en flammes de pentlandite dans la pyrrhotite, avec des amas de chalcopyrite (LR; 24-OB-7032-C1). (Abréviations : CP : Chalcopyrite ; CX : Clinopyroxène ; MG : Magnétite ; OX : Orthopyroxène ; PG : Plagioclase ; PN : Pentlandite ; PO : Pyrrhotite ; SF : Sulfures ; LN : Lumière naturelle ; LP : Lumière polarisée ; LR : Lumière réfléchie).



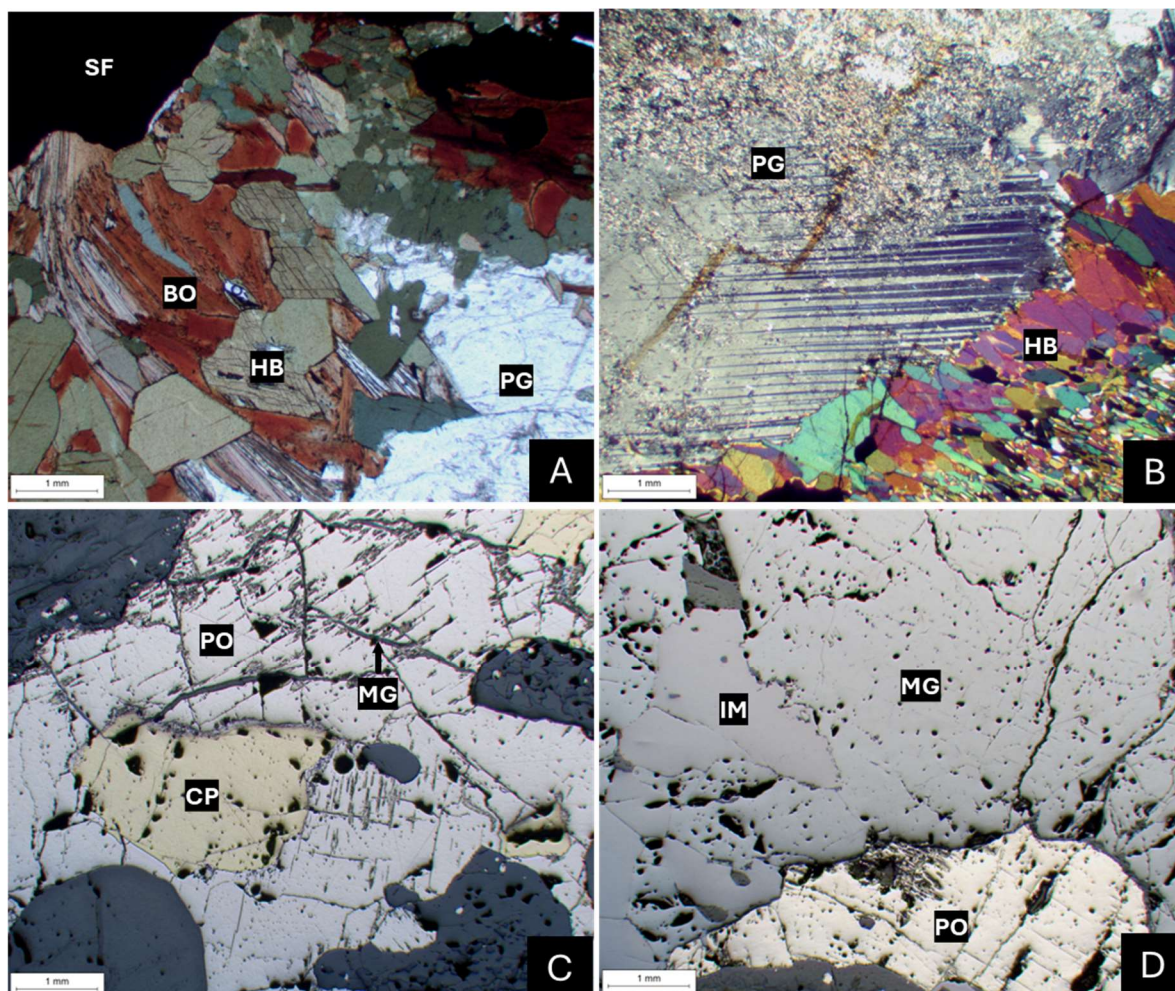


Figure 21: Microphotographie de la minéralisation disséminée A) remplacement totale des pyroxènes en hornblende et biotite (LN ; 24-OB-7033-B2) ; B) hornblende et séricitisation de plagioclase (LP ; 24-OB-7033-B2) ; C) pyrrhotite fracturée, altérée en magnétite au niveau des fractures, avec amas de chalcoppyrite (LR ; 24-OB-7033-B2) ; D) grain de l'ilménite dans la magnétite, et la pyrrhotite (LR ; 24-OB-7033-B2). (Abréviations : BO : Biotite ; CP : Chalcoppyrite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; PO : Pyrrhotite ; PG : Plagioclase ; SF : Sulfures ; LN : Lumière naturelle ; LP : Lumière polarisée ; LR : Lumière réfléchie).

## 6. Déformation des unités du secteur d'étude

Le secteur d'étude est découpé par plusieurs grandes zones de failles généralement orientées NE-SW, notamment la Faille du Lac à Paul et l'extension nord de la Zone de déformation de Pipmuacan (Figures 2 et 22 ; Faille de Pamouscachiou ; Hébert et al., 2009). Ces grands corridors de failles, souvent anastomosés, sont considérés comme de grands chevauchements qui ont été réactivés en décrochement dextre (Turcotte 2001).

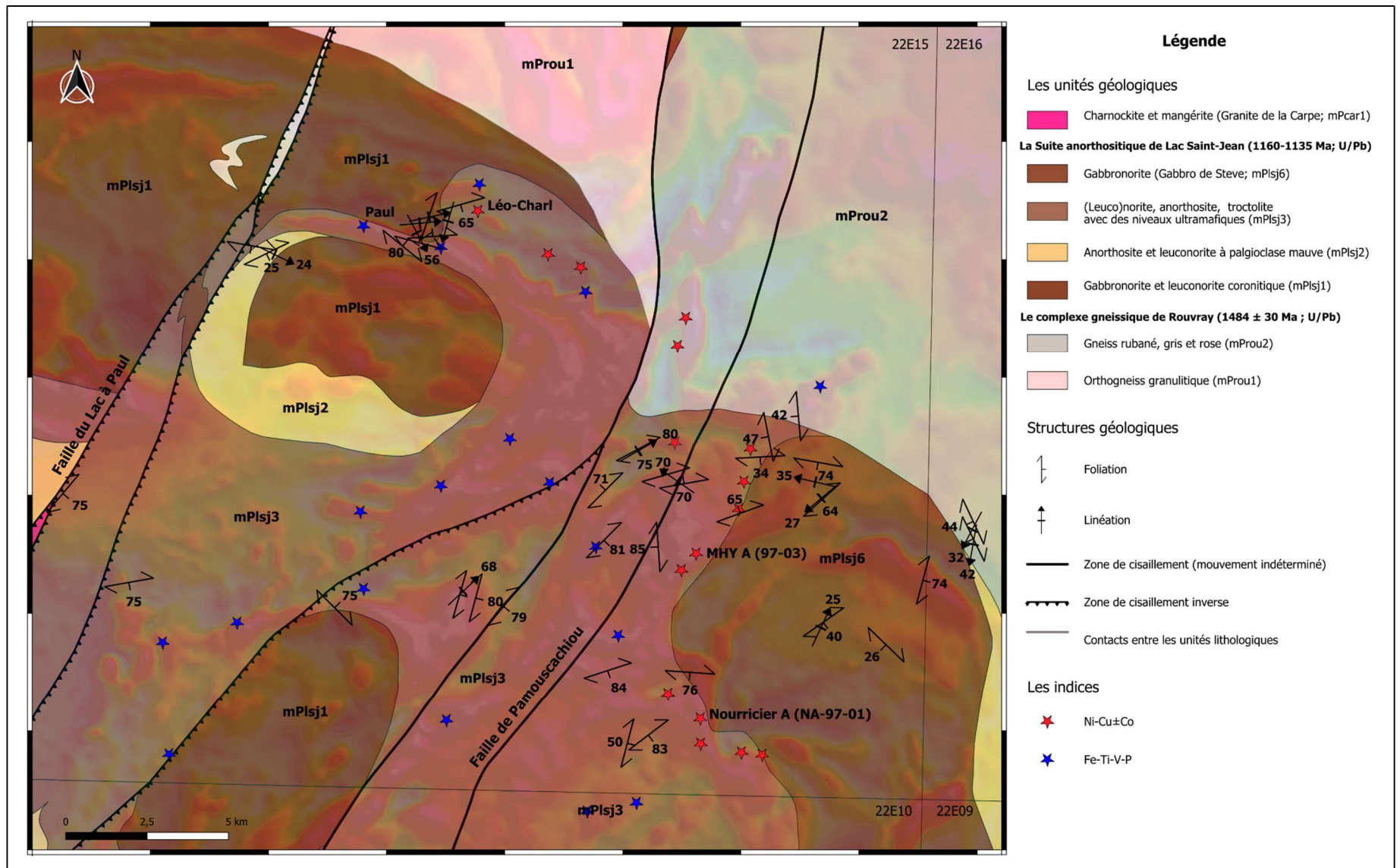


Figure 22 : Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude avec structures mesurées sur le terrain lors de cette étude (modifiée d'après SIGÉOM 2024).

Les structures observées de secteur d'étude incluent du litage primaire, des foliations, gneissosité, linéations d'étirement ainsi que zones mylonitiques.

### **6.1. Le litage Primaire**

Le litage primaire est très rarement observé dans la zone d'étude. Il a été observé à un seul affleurement (24-OB-7032) lors de la campagne de terrain. Ce litage se distingue par des lits de tailles variées (allant de centimétrique à décimétriques), où s'alterne la norite et la leuconorite (Figure 18 A). Le litage est généralement à faible pendage ( $\sim 30^\circ$ ), ce qui pourrait expliquer pourquoi il est peut souvent visible sur les affleurements relativement plats typiques du secteur.

### **6.2. La Foliation et linéation**

Les foliations observées dans les roches de la suite anorthositique du secteur d'étude se caractérisent par un alignement préférentiel des minéraux, en particulier des minéraux ferromagnésiens tels que la biotite, la hornblende et les pyroxènes ( $\pm$  olivine ; Figure 22). La linéation d'étirement dans le secteur d'étude se manifeste par un allongement préférentiel des minéraux ferromagnésiens (pyroxène, biotite, hornblende) dans le plan de foliation.

Le secteur d'étude se découpe en 3 sous-domaines structuraux : domaine sud/sud-est (portion sud de la carte jusqu'à Nourricier – MHY), domaine nord (portion nord de la SALSJ, secteur Lac à Paul – Léo-Charl), et domaine Est (gabbro de Steve ; mPlsj6).

Dans le domaine sud/sud-est, les foliations présentent une orientation générale NE-SW, avec un pendage subvertical, généralement légèrement incliné vers le NW, et des linéations fortement plongeant vers le N-NE (Figure 23 A). Des enclaves de gabbro-norite à grain fin, de dimensions pouvant atteindre 30 cm  $\times$  2 m, parallèles à la foliation, ont été observées dans les leucotroctolites de cette unité (Figure 9 D). De mince zone de mylonite de 30 à 50 cm d'épaisseur, orientée NE-SW, ont été localement observées (Figure 7 F).

Dans le secteur nord, on observe des feuillets de gneiss quartzofeldspathiques et dioritiques faillés de Complexe gneissique de Rouvray (mProu1 ; Figures 5A et 5B) dans les roches de la SALSJ. La gneissosité est généralement orientée est-ouest à ESE-WNW



avec des pendages modérés (30 à 40°) vers le sud. La linéation présente un plongement de 40°, généralement vers l'Est. Dans les roches de la SALSJ, les foliations sont généralement E-W et à faible pendage (~20-25°) et les linéations sont généralement modérément plongeante vers le sud-est (Figure 23 B).

Dans le domaine Est (Gabbro de Steve ; unité mPlsj6), l'orientation de la foliation varie considérablement à travers l'unité, suivant le patron circulaire suggéré par l'anomalie géophysique (Figures 22 et 23 C). La foliation est particulièrement bien développée en marge de cette unité (Figure 16 A). On observe localement la présence de zones mylonitiques, orientées 000/60°, avec des indicateurs cinématiques suggérant un mouvement dextre au sein de l'unité (Figure 16 A).

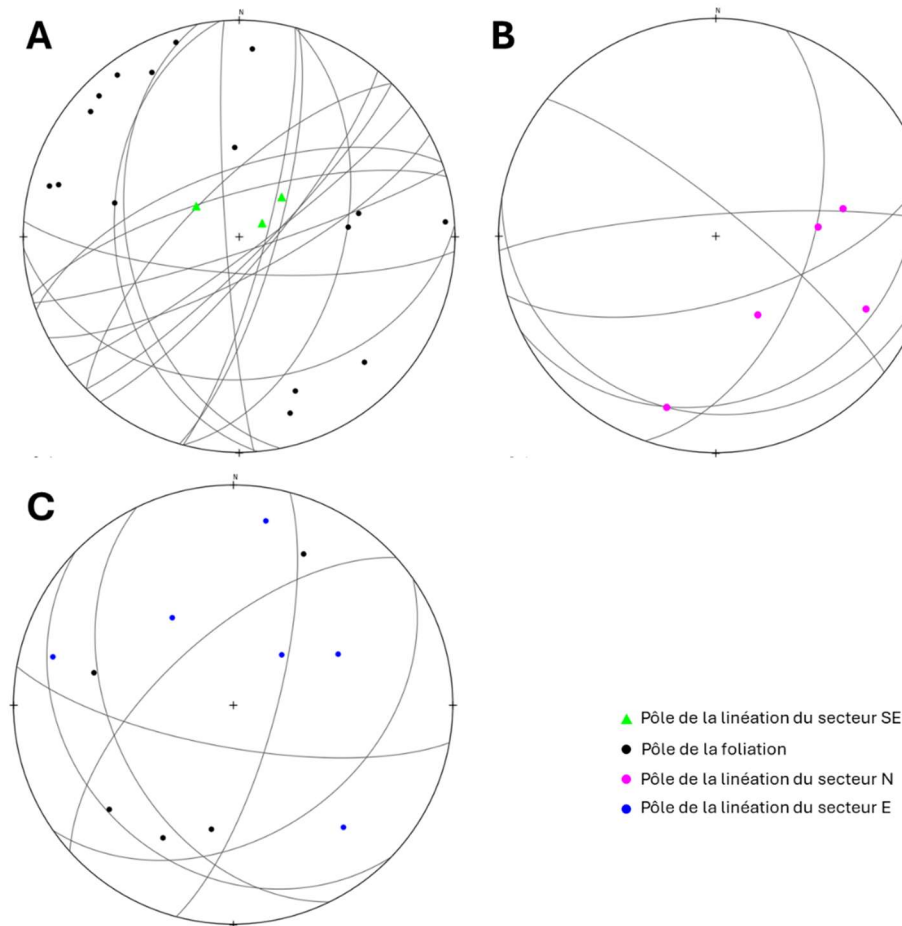


Figure 23: Stéréonets (hémisphère sud) des structures mesurées sur le terrain : foliation et linéation minérale dans la zone d'étude. A) secteur sud-est (triangle vert : linéation; cercle noir : pôle foliation), B) secteur nord (cercle rose : linéation) et C) secteur Est (cercle bleu : linéation ; cercle noir : pôle linéation).

## 7. La calcicité par fluorescence X portative (XRFp)

La calcicité des plagioclases désigne la quantité de calcium par rapport au sodium dans leur structure cristalline, exprimée en pourcentage d'anorthite (% An). Le rapport, souvent noté % An, est calculé selon le ratio molaire entre le calcium et la somme du calcium et du sodium ( $\% \text{An} = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na}) * 100$ ). Ces minéraux forment une série continue de feldspaths dans laquelle le calcium (Ca) et le sodium (Na) sont présents en proportions variables, allant de l'albite ( $\text{An}_{0-10}$ ), qui est riche en Na, à l'anorthite ( $\text{An}_{90-100}$ ), riche en Ca. Le % An de plagioclase permet la classification des types de plagioclases (Streikeisen, 1976). Elle est également utilisée pour déterminer le degré d'évolution du magma (Morse 1984 ; Grove et al. 1984). Dans la SALSJ, la calcicité des plagioclases se situe généralement entre 30 % et 60 % d'anorthite, correspondant aux compositions d'andésine et de labradorite (Ashwal et Bybee, 2017 ; Hébert et al., 2009 ; Grant 2020 ; Hassan Ali et al., 2023, 2024 et Katako Diyoyo et al., 2024). Dans cette étude, on utilise les calcicité suivantes pour déterminer les types de plagioclases du secteur : andésine ( $\text{An}_{30-48}$ ), transitionnelle ( $\text{An}_{48-52}$ ), et labradorite ( $\text{An}_{52-70}$ ).

### 7.1. Méthode d'analyse

La fluorescence-X portative (XRFp) est une technique de plus en plus utilisée par l'industrie pour aider assister en cartographie et en exploration. Cet appareil utilise des rayons X pour exciter les atomes de l'échantillon ou de minéral, entraînant l'émission de rayons X secondaires caractéristiques de chaque élément présent dans la surface d'analyse de l'échantillon. En analysant l'intensité de ces rayonnements, il est possible de déterminer la composition élémentaire de l'échantillon ou de minéral, y compris les concentrations de Ca et de Si. Cependant, le XRFp présente des limitations pour la détection du Na, en raison de la faible énergie de fluorescence de cet élément léger. Pour surmonter cette contrainte, Tondoh (2021), sous la supervision de S. Dare et R-L. Simard de l'UQAC, a développé une méthode qui utilise le ratio Ca/Si comme indicateur fiable pour estimer la calcicité des plagioclases. Cette approche repose sur la double substitution au sein de la structure des plagioclases, où le calcium et le silicium remplacent respectivement le sodium et l'aluminium ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} \rightleftharpoons \text{Na}^{+} + \text{Si}^{4+}$ ).



La méthode de mesure de la calcicité à l'aide d'un XRFp comporte plusieurs étapes clés. Les échantillons doivent être préparés avec une surface sciée, afin de réduire les erreurs liées aux irrégularités (Mercier, 2022). Le faisceau de 3 mm du XRFp est dirigé sur chaque point d'analyse pendant environ 60 secondes pour obtenir une lecture valable (Tondoh, 2021). Plusieurs précautions sont prises, notamment l'exclusion des analyses qui contiennent de Fe et de Mg, car ces éléments sont souvent associés à des impuretés de minéraux ferromagnésiens tels que l'olivine, le pyroxène, la hornblende ou la biotite dans le grain de plagioclase, ce qui pourrait fausser les résultats de calcicité. De plus, une correction de dérive instrumentale est effectuée régulièrement à l'aide d'un échantillon de référence dont la composition est connue. Cette correction assure la cohérence des valeurs de calcicité et permet d'obtenir une estimation précise et fiable de la composition des plagioclases (Tondoh, 2021).

Pendant l'été 2024, des analyses XRFp ont été réalisées, afin d'évaluer la calcicité des plagioclases des faciès anorthositiques de la zone d'étude. Les mesures de calcicité réalisées dans cette étude reposent sur la méthode développée par Tondoh (2021) et Mercier (2022). L'appareil utilisé est un modèle Olympus Vanta VMR, fourni par le MRNF.

Pour assurer l'intégrité et la fiabilité des données, des matériaux de référence standard des plagioclases, fournis par le laboratoire LabMaTer (échantillons 20AT04 et RTS026B ; Katako Diyoyo et al., 2024) ont été systématiquement analysés au début et à la fin de chaque journée d'analyses (Annexes 5 et 6). Cette procédure a pour objectif d'évaluer rigoureusement la qualité des résultats obtenus (précision et justesse). Elle garantit également que les performances de l'instrumentation restent constantes tout au long de la session d'analyse et permet de détecter rapidement tout écart éventuel dans les résultats.

Les résultats des analyses effectuées sur les matériaux de référence standard (RTS026B et 20AT04) témoignent d'une excellente justesse (% différence relative) : 1,7 % pour le % An et 0,3 % pour le Sr pour 20AT04, et 5,8 % pour le % An et 2,1 % pour le Sr pour RTS026B. Cette performance met en évidence la capacité de l'instrument à fournir des résultats fidèles aux valeurs réelles. Par ailleurs, la précision (% écart-type relatif) des mesures est également satisfaisante, atteignant 1,6 % pour le % An et 2,5 % pour le Sr pour 20AT04, ainsi que 1,2 % pour le % An et 5,0 % pour le Sr pour RTS026B (Annexes 5 et

6). Ces résultats sont particulièrement significatifs, car ils montrent que XRFp du MRNF fonctionne de manière fiable pour les éléments analysés de plagioclase sans nécessiter de corrections (Katako Diyoyo et al., 2024).

Sur les 84 échantillons prélevés à partir de 59 affleurements, les plagioclases des roches anorthositiques de taille supérieure à 3 mm ont été analysées dans 59 échantillons sciés, pour un total de 364 analyses. Pour chaque échantillon, entre 3 et 6 grains de plagioclase ont été examinés. Lorsque présent, la matrice de plagioclase a également été examinée, mais seules les analyses des grains ont été projetées dans le diagramme. Les résultats indiquent que 286 analyses ont montré des concentrations élevées en Fe (0,16 - 14,45 %) et Mg (0,34 - 3,83 %), suggérant la présence d'impuretés dans le plagioclase ou d'autres minéraux dans la fenêtre d'analyse. Parmi ces analyses, 123 ont révélé la présence simultanée de Fe et Mg, ce qui est attribuable à des minéraux ferromagnésiens (pyroxène/olivine). Ces minéraux silicatés, contenant du Si et parfois du Ca, altèrent le rapport Ca/Si et n'ont donc pas été inclus dans le calcul de la calcicité (Katako Diyoyo et al., 2024). En revanche, 163 analyses ont détecté du Fe sans Mg. Dans ce cas, le Fe est associé à des oxydes de fer, sans silicates, ce qui n'affecte pas le rapport Ca/Si, car ces minéraux ne contiennent ni Si ni Ca dans leur composition chimique. Ces analyses ont donc été prises en compte pour mesurer la calcicité. Des détails supplémentaires, y compris les données de XRFp et les aspects liés au QAQC, sont disponibles en annexes 2 à 6.

## **7.2. Distribution spatiale de la composition de plagioclase**

Les données XRFp de cette étude sont présentées dans un diagramme binaire % Sr vs. % An (Figure 24 A) et comparées aux données des plagioclases provenant des différentes marges de la SALSJ et du massif anorthositique de Mattawa ( $1016 \pm 2$  Ma ; Hébert et al., 2005 ; Figure 24 B). Ce diagramme montre que la calcicité des plagioclases de la SALSJ varie entre 38 % An et 66 % An, tandis que celle du massif de Mattawa se situe entre 30 % An et 42 % An. Le massif anorthositique de Mattawa se caractérise par des teneurs en Sr élevées (0,15 à 0,28 % An ; Miloski, 2023) comparativement à celles de la SALSJ (0,05 à 0,15 % An). De plus, les plagioclases des différentes marges de la SALSJ ont des compositions différentes. La marge Ouest (Gueye, 2023) présente des teneurs en Sr faibles (0,02 - 0,08 %) par rapport à la marge Est (Diyoyo et al., 2025), qui présente des teneurs

en Sr moyennes (0,01- 0,23 %) et celles de marge Sud (0,07 - 0,13 % : Katako Diyoyo et al., 2024).

Dans cette étude (la marge nord), la calcicité du plagioclase varie de 36,8 à 50,8 % An, ce qui correspond à de l'andésine à une composition transitionnelle (An<sub>48-50</sub>; Figure 24 A). Les lithologies contenant de la labradorite (An<sub>50-70</sub>) sont rares (n = 1). La majorité des échantillons (anorthosite, (leuco)troctolite, (leuco)norite, (leuco)gabbronorite) présentent des teneurs en strontium faibles (0,07 à 0,08 %), similaires à celles des plagioclases de la marge Ouest de la SALSJ. Quelques échantillons (leuconorite) présentent des teneurs en Sr légèrement plus élevées (0,08 à 0,11 %), similaires à celles des plagioclases de la marge Est de la SALSJ. La composition des plagioclases issus des échantillons à apatite (y compris les lithologies nelsonitiques), ainsi que de la minéralisation en sulfures, montre des teneurs en Sr faibles.

La distribution spatiale de ces données sont présentées à la Figure 25. La partie Est du secteur d'étude est dominée par l'andésine (An<sub>38-47</sub>), avec une tendance vers une composition transitionnelle (An<sub>48-50</sub>) dans les parties sud-ouest et nord. Les différentes valeurs de Sr mesurées suggèrent l'existence de deux populations distinctes de lithologies anorthositiques : une majorité à faibles valeurs de Sr (0,06 - 0,08 %) à l'ouest et à l'Est, et des lithologies avec des valeurs plus élevées (jusqu'à 0,11 %) concentrées au centre du secteur dans le corridor de la faille Pamouscachiou (Figure 25).

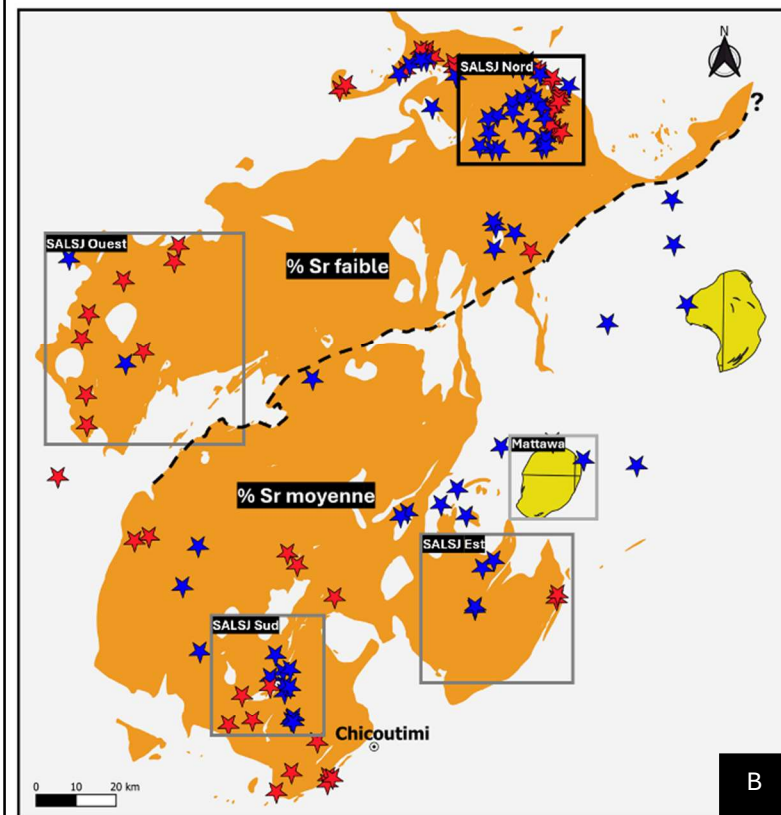
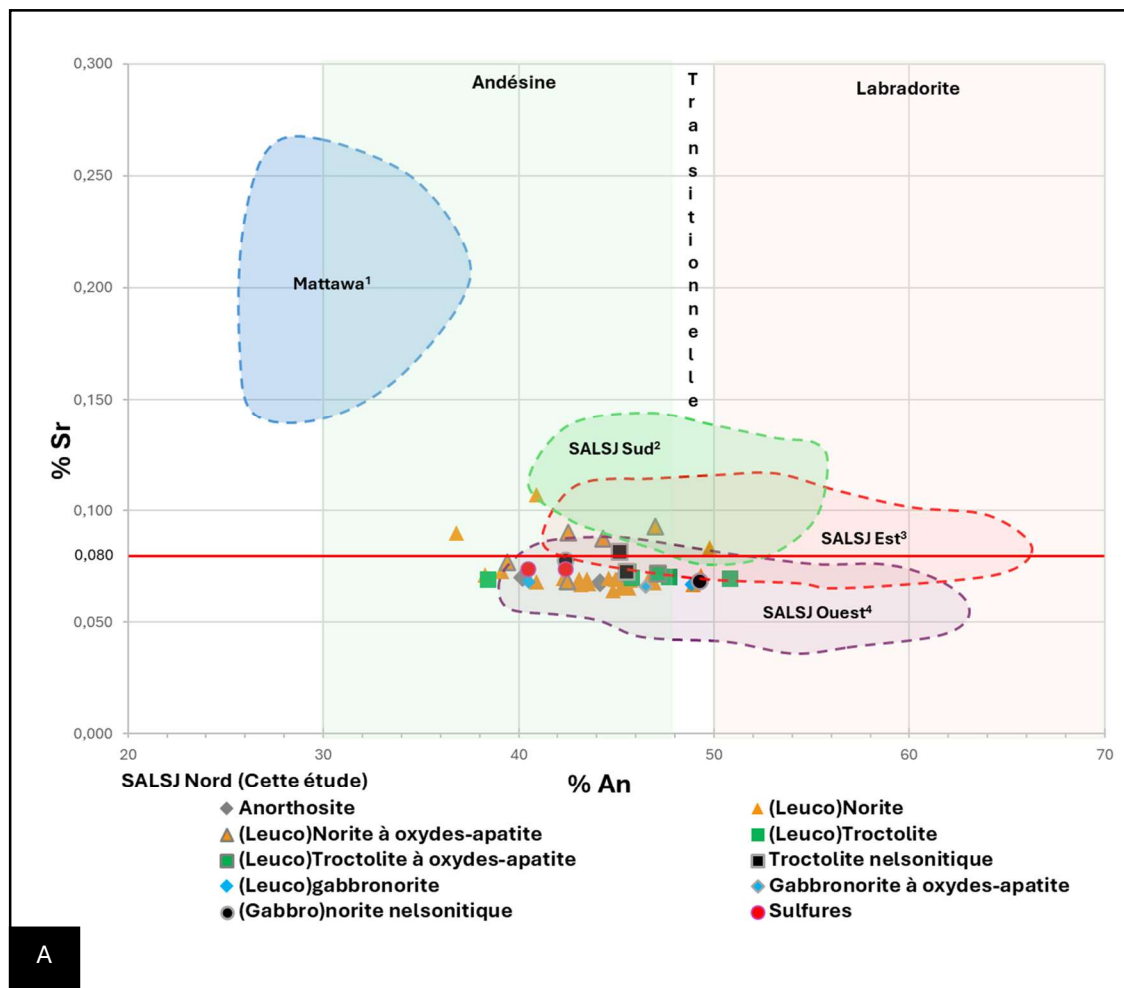


Figure 24: La calcicité et % en Sr des différentes marges de la SALSJ et Mattawa. A) Diagramme binaire des teneurs moyennes en Strontium (% Sr) et en anorthite (% An) de plagioclase des faciès anorthositique de Mattawa et des faciès anorthositiques de secteur d'étude (SALSJ Nord) en comparaison avec les données des marges Est, Ouest Sud de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ); B) La localisation des différents secteurs des études sur la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (1160-1135Ma) et de Mattawa (1016 Ma). (Source de données de plagioclase par XRFp : 1 -Mattawa: Miloski, 2023; 2 - SALSJ Sud : Katako Diyoyo et al., 2024; 3 – SALSJ Est: Diyoyo et al., 2025; 4 – SALSJ Ouest: Gueye, 2023.

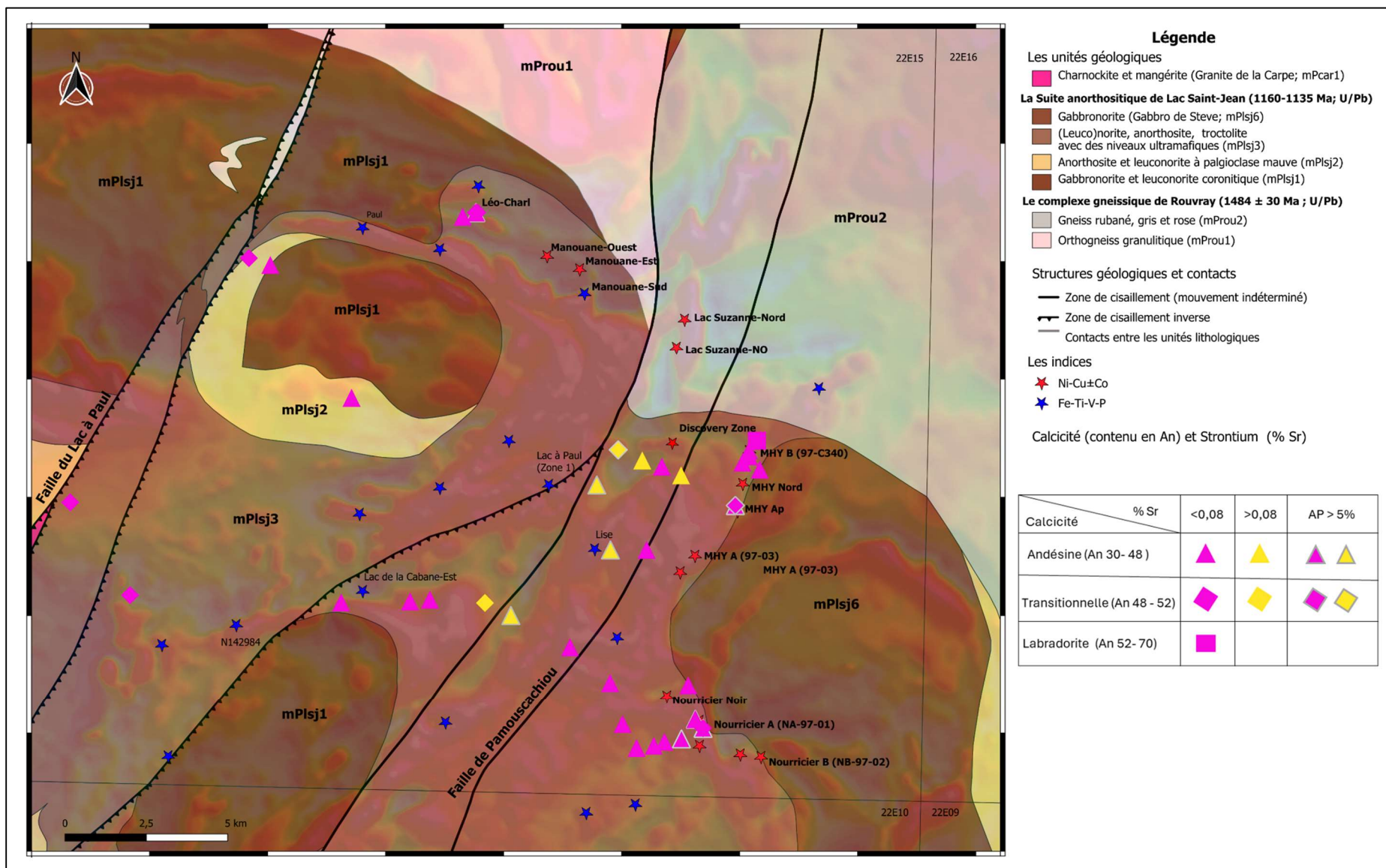


Figure 26: Carte géologique sur fond géophysique de secteur d'étude montrant la distribution spatiale de la composition de plagioclase (par XRFp) dans les différentes lithologies de la SALSJ (modifiée d'après SIGÉOM 2024). (AP : Apatite)



## **8. Lithogéochimie de roche totale**

### **8.1. Méthodes analytiques**

Cinquante et un échantillons ont été sélectionnés pour des analyses de la roche totale des éléments majeurs, mineurs et traces. Cela comprend 3 anorthosites, 5 leucotroctolites, 2 leucotroctolites à oxydes-apatite, 2 troctolites nelsonitiques, 11 leuconorites, 4 leuconorites à oxydes-apatite, 1 leuconorite nelsonitique, 3 norites, 1 norite à oxydes-apatite, 8 (leuco)gabbronorites, 1 gabbronorite à oxydes-apatite, 1 gabbronorite nelsonitique, 3 (leuco)gabbronorites de Steve, 1 orthopyroxénite, 1 webstérite, ainsi que 4 échantillons minéralisés en sulfures de l'indice de Léo-Charl.

Les analyses ont été effectuées au laboratoire Actlabs, Ancaster (Ontario, Canada). Les échantillons ont été d'abord broyés, puis fondus avec borates de lithium. Après fusion, la perle obtenue a été digérée dans une solution d'acide nitrique diluée. L'analyse a été réalisée par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy) pour les éléments majeurs, et par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry) pour les éléments traces. Certains éléments traces (Ag, Cd, Cu, Mo, Ni, S, Zn) ont été quantifiés par ICP-AES après une digestion totale à chaud par quatre acides. Les éléments As, Au, Cr, Sb, Sc et Se ont été analysés par activation neutronique (INAA ; Instrumental Neutron Activation Analysis). Les analyses des roches incluant les aspects liés au QAQC, sont disponibles en annexes 7 à 10.

### **8.2. Les oxydes majeurs**

Les roches analysées ont été rapportées dans des diagrammes de corrélation des oxydes majeurs ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeOt}$ ,  $\text{TiO}_2$ , et  $\text{P}_2\text{O}_5$  wt. %) en fonction du  $\text{SiO}_2$  (wt. % ; Figure 26), également appelés diagrammes de Harker. Les valeurs de  $\text{FeOt}$  rapportées ont été calculées à partir des teneurs en  $\text{FeO}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  selon la formule  $\text{FeOt} = \text{FeO} + (\text{Fe}_2\text{O}_3 * 0,8998)$ . Pour les oxydes dont la concentration est inférieure à la limite de détection (LOD), une valeur équivalente à 0,5 fois la limite de détection (LOD) a été attribuée.

Des analyses microsondes du plagioclase, de l'olivine, de l'orthopyroxène, du clinopyroxène, de la hornblende, de la biotite, de l'ilménite, de la magnétite, de l'apatite, du spinelle, et de la pyrrhotite ont été intégrées de la littérature (Grant, 2020 ; Huss, 2002) à la figure 26. Ceci permet d'évaluer l'influence de chaque phase minérale sur la composition chimique globale des roches, confirmant ainsi la pétrographie.

Les échantillons sont divisés en deux groupes selon leur teneur en  $\text{SiO}_2$  (Figure 26). Le groupe à haute teneur en  $\text{SiO}_2$  ( $> 35$  wt. % de  $\text{SiO}_2$ ) comprend les lithologies enrichies en minéraux silicatés (anorthosite, troctolites, leuconorite, etc.). Le groupe à faible teneur en  $\text{SiO}_2$  ( $< 35$  wt. %) comprend les lithologies enrichies en oxydes de fer et en sulfures.

Les anorthosites sont les plus riches en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (23,2 - 26,6 wt. %; Figure 26 B),  $\text{Na}_2\text{O}$  (4,5 - 5,4 wt. % ; Figure 26 A) et les plus pauvres en  $\text{MgO}$  (0,1 - 0,5 wt. % ; Figure 26 D) et  $\text{FeOt}$  (1,1 - 9,4 wt. % ; Figure 26 G) ; elles présentent des teneurs en  $\text{CaO}$  entre 7,92 et 9,54 wt. % (Figure 26 C) et sont concentrées autour du pôle du plagioclase.

Les leucotroctolites et les leucotroctolites à oxydes-apatite sont plus pauvres en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12,1 - 23,6 wt. % ; Figure 26 B) et  $\text{Na}_2\text{O}$  (2,3 - 4,4 wt. % ; Figure 26 A) et plus riches en  $\text{MgO}$  (3 - 9,8 wt. % ; Figure 26 D) et  $\text{FeOt}$  (5,3 - 16,2 wt. % ; Figure 26 G). Elles présentent des teneurs en  $\text{CaO}$  entre 7 et 11,5 wt. % (Figure 26 C) et sont distribuées entre le pôle plagioclase et le pôle olivine, avec une évolution des (leuco)troctolites à oxydes-apatite et nelsonitiques vers les pôles apatite, ilménite et magnétite. Les leucotroctolites à oxydes-apatite, présentent des teneurs modérées en  $\text{FeOt}$  (9 - 16,2 wt. % ; Figure 26 G),  $\text{TiO}_2$  (1,4 - 2,7 wt. % ; Figure 26 F) et  $\text{P}_2\text{O}_5$  (3,2 - 6 wt. % ; Figure 26 H). Tandis que, les troctolites nelsonitiques sont les plus enrichies en ces éléments, atteignant entre 19 et 32,3 wt. % de  $\text{FeOt}$ , entre 6,7 et 7,3 wt. % de  $\text{TiO}_2$  et entre 6,7 et 8,6 wt. % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  et les plus pauvres en  $\text{SiO}_2$  (22,9 - 33,7 wt. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 - 11,3 wt. %) et  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,9 - 2 wt. %).

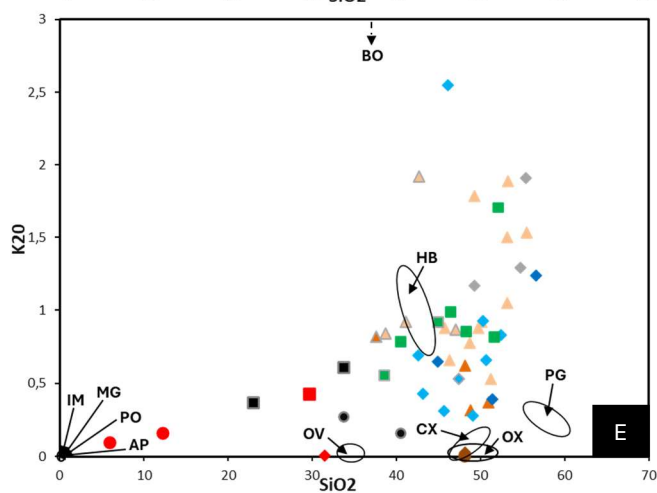
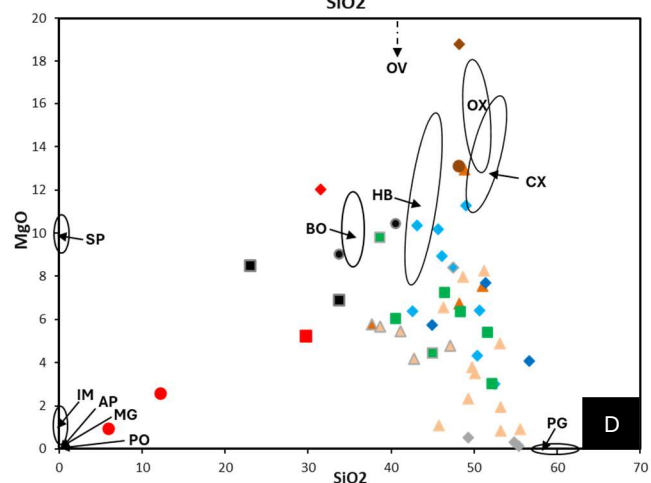
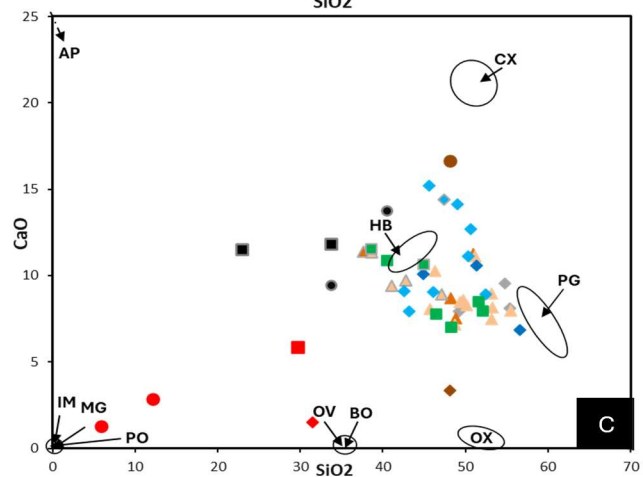
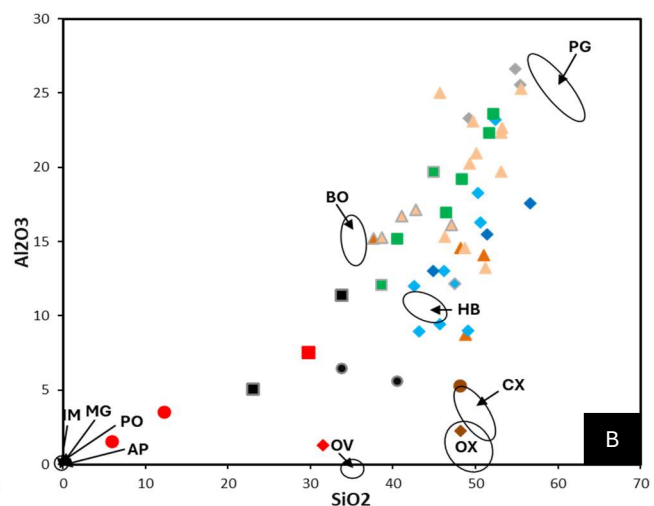
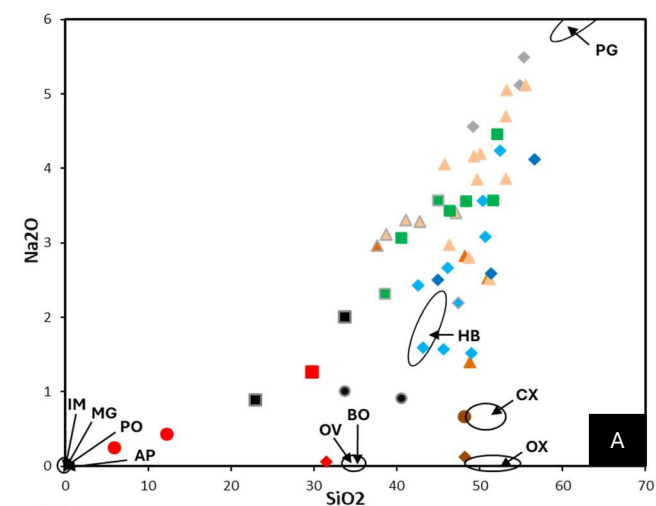
Les (leuco)norites, les (leuco)gabbonorites et les (leuco)gabbonorites de Steve sont les plus riches en  $\text{CaO}$  (6,9 - 15,2 wt. % ; Figure 26 C) présentent des concentrations en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 8,7 et 25,8 wt. % (Figure 25 B) et  $\text{MgO}$  entre 0,8 et 12,9 wt. % (Figure 26 D). Elles sont distribuées entre les pôles plagioclase, orthopyroxène et clinopyroxène. Une concentration marquée des leucogabbonorites est observée autour du pôle de la hornblende. Quelques leuconorites à oxydes-apatite évoluent vers le pôle biotite,

ilménite et magnétite et présentent des teneurs élevées en  $K_2O$  (0,2 - 2,55 wt. % ; Figure 26 E),  $FeOt$  (11,4 - 14,4 wt. % ; Figure 26 G),  $TiO_2$  (3,5 - 5 wt. % ; Figure 26 F), et  $P_2O_5$  (1,4 - 5 wt. % ). Les (gabbro)norites nelsonitiques sont les plus riches en  $FeOt$  (17,8 - 23,5 wt. % ; Figure 26 G),  $TiO_2$  (8,9 - 12,1 wt. % ; Figure 26 F),  $P_2O_5$  (1 - 3 wt. % ; Figure 26 H), et pauvres en  $SiO_2$  (33,7 - 40,53 wt. % ; Figure 26 F),  $Al_2O_3$  (5,6 - 6,4 wt. % ; Figure 26 B) et  $Na_2O$  (1 wt. % ; Figure 26 A) ; elles sont distribuées entre les pôles plagioclase, pyroxène, apatite, ilménite et magnétite.

Le dyke d'orthopyroxénite est riche en  $MgO$  (18,7 wt. % ; Figure 26 D),  $FeOt$  (22,7 wt. % ; Figure 26 G), et pauvre en  $CaO$  (3,3 wt. % ; Figure 25 C),  $Na_2O$  (0,13 wt. % ; Figure 25 A) et  $Al_2O_3$  (2,26 wt. % ; Figure 26 B) ; il est reporté dans le champ de l'orthopyroxène, tandis que la webstérite est plus riche en  $CaO$  (16,6 wt. % ; Figure 25 C) et se trouve dans le champ du clinopyroxène.

Les diagrammes  $SiO_2$  vs  $FeOt$ ,  $TiO_2$  et  $P_2O_5$  (Figure 26) illustrent l'abondance des oxydes de Fe-Ti, des sulfures et de l'apatite dans les lithologies. Pour le groupe pauvre en  $SiO_2$  (c'est-à-dire minéralisé en oxydes-apatite (nelsonitiques) ou en sulfures), les roches nelsonitiques (leucotroctolite et gabbro-norite) présentent des teneurs élevées en  $FeOt$  (17,9 - 32,2 wt. % ; Figure 26 G),  $TiO_2$  (6,6 - 12,1 wt. % ; Figure 26 F) et  $P_2O_5$  (0,83 - 8,5 wt. % ; Figure 26 H), avec une tendance vers les pôles ilménite/magnétite et apatite. Les sulfures, quant à eux, sont très riches en  $FeOt$  (35,1 - 68,2 wt. % ; Figure 26 G), évoluant vers le pôle pyrrhotite, mais montrent des teneurs beaucoup plus faibles en  $TiO_2$  (0,3 - 4,4 wt. % ; Figure 26 F) et très faibles en  $P_2O_5$  (0,08 - 0,4 wt. % ; Figure 26 H).

La majorité des lithologies riches en minéraux silicatés (leucotroctolites, leuconorites, etc.) sont anormalement enrichies en  $TiO_2$  (1 - 5,9 wt. % ; Figure 26 F) et en  $P_2O_5$  (1 - 6 wt. % ; Figure 26 G), ce qui confirme la présence de plus de 5 % d'apatite et de plus de 2 % d'oxydes dans ces lithologies. Dans d'autres régions de la SALSJ, la teneur en  $P_2O_5$  de lithologies similaires est généralement très faible ( $< 0,5$  wt. %  $P_2O_5$ ), à l'exception des dykes de ferrodiorite qui peuvent atteindre 1 - 2 wt. %  $P_2O_5$  (Hassan Ali et al., 2023, 2024). Seules les anorthosites, la minéralisation en sulfures, le dyke d'orthopyroxénite, la webstérite et quelques leuconorites et leucotroctolites présentent de faibles teneurs en P ( $< 0,5$  wt. %).



- ◆ Anorthosite
- ▲ Norite
- ▲ Norite à oxydes-apatite
- ▲ Leuconorite
- ▲ Leuconorite à oxydes-apatite
- ◆ (Leuco)gabbronorite à oxydes-apatite
- ◆ (Leuco)gabbronorite
- ◆ (Leuco)gabbronorite de Steve
- Leucotroctolite
- Leucotroctolite à oxydes-apatite
- Troctolite nelsonitique
- Webstérîte
- ◆ Dyke d'orthopyroxénite
- (Gabbro)norite nelsonitique
- Sulfures massifs
- ◆ Sulfures semi-massifs
- Sulfures disséminés



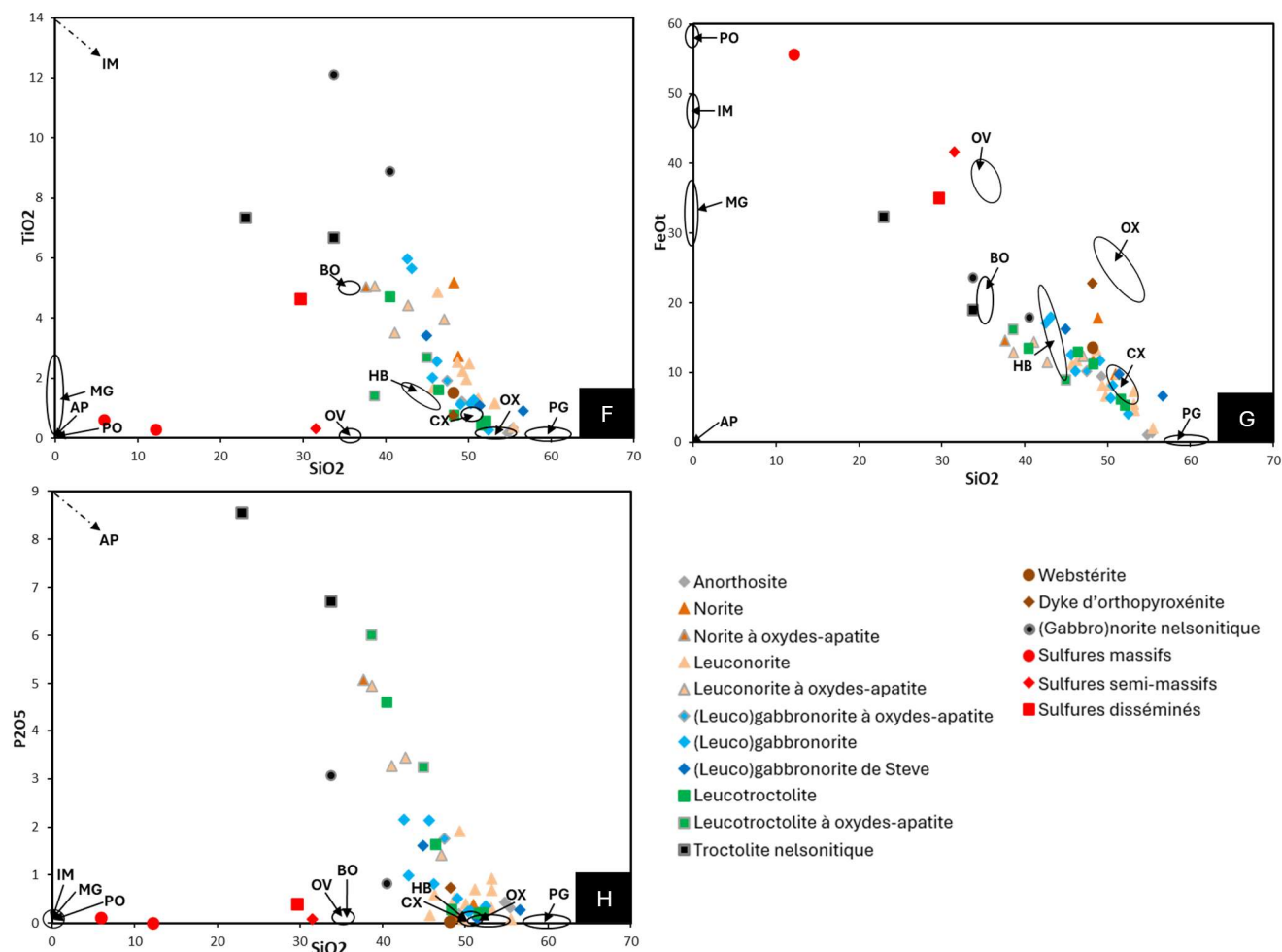


Figure 28 : Diagrammes binaires de Harker. A) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs SiO<sub>2</sub> ; B) Na<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> ; C) MgO vs SiO<sub>2</sub> ; D) CaO vs SiO<sub>2</sub> ; E) K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> ; F) FeOt vs SiO<sub>2</sub> ; G) TiO<sub>2</sub> vs SiO<sub>2</sub> ; H) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vs SiO<sub>2</sub>. Les analyses des pôles minéralogiques par microsonde proviennent des données de Grant, 2020 et Huss, 2002. (Abréviations : AP : Apatite ; Bo : Biotite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; OV : Olivine ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; SP : Spinelle)

### 8.3. Éléments traces

#### 8.3.1. Le spectre des éléments de terres rares (ETR) et multi-éléments

Dans la Figure 27, les valeurs des éléments de terres rares (ETR) sont normalisées par rapport à la composition de la chondrite de McDonough et Sun (1995), et les valeurs de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (en wt. %, et non normalisées) ont été ajoutées pour estimer l'influence de l'apatite sur les spectres de ETRs. Et dans la Figure 28, les diagrammes multi-éléments réalisés présentent des valeurs normalisées par rapport à la composition du manteau primitif de Sun et McDonough (1989). Pour les éléments dont les concentrations sont inférieures à la limite de détection (LOD), une valeur correspondant à LOD x 0,5 leur est attribuée. De plus, la

limite de détection est indiquée dans les diagrammes. Les échantillons représentés par des lignes pointillées dans les diagrammes ne sont pas représentatifs de la composition réelle de la roche. Cette variation peut résulter du broyage et de l'analyse d'une portion d'échantillon dans laquelle le plagioclase est surreprésenté par rapport aux minéraux mafiques, en raison de la granulométrie très grossière des roches. Les spectres des terres rares sont fortement influencés par la présence de plagioclase, d'apatite et de pyroxène. Ainsi, les lithologies sont présentées dans un ordre qui illustre le contrôle minéralogique sur les ETRs dans les roches plutoniques (c'est-à-dire les cumulats).

Les anorthosites se caractérisent par un enrichissement en ETR par rapport à la chondrite (Figure 27). Elles se distinguent par un enrichissement en terres rares légères (LETR) par rapport aux terres rares lourdes (HETR), avec un rapport  $(La/Yb)_N$  compris entre 9,1 et 17,3 (médiane = 14,6). De plus, elles présentent une forte anomalie positive en Eu (avec une médiane  $(Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)}) = 3,9$ ) indiquant une accumulation significative de plagioclase. Dans le diagramme multi-élément, les anorthosites présentent des concentrations élevées en Ba, K, Eu et Sr confirment l'abondance de plagioclase (Figure 28), et un appauvrissement en Ti, Nb et P reflètent la faible abondance de l'ilménite et de l'apatite qui contrôlent ces éléments. Les faibles concentrations de Zr peuvent s'expliquer par la rareté du zircon dans ces lithologies.

La majorité des lithologies à olivine (leucotroctolites, leucotroctolites à oxydes-apatite et troctolites nelsonitiques) sont enrichies en  $P_2O_5$  (0,2 - 8,5 wt. % ; Figure 26 H) et se caractérisent donc par un enrichissement en ETR par rapport aux anorthosites (Figure 27 A). Les troctolites nelsonitiques (6,7 - 8,5 wt. %  $P_2O_5$ ; Figure 26 H) présentent des concentrations en ETR plus élevées que les leucotroctolites à oxydes-apatite (3,2 - 6 wt %  $P_2O_5$ ) et les leucotroctolites (0,2 - 4,6 wt. %  $P_2O_5$ ), ce qui confirme l'influence de l'apatite, qui concentre les éléments ETR. Ces lithologies enrichies en apatite montrent un enrichissement en LETR par rapport aux HETR, avec une médiane du rapport  $(La/Yb)_N$  de 6,7. Concernant les anomalies en Eu, les leucotroctolites ne présentent pas d'anomalie notable ( $Eu/Eu^* = 0,87 - 1,12$ ), les leucotroctolites à oxydes-apatite montrent une très faible anomalie en Eu (médiane  $Eu/Eu^* = 0,85$ ), tandis que les troctolites nelsonitiques présentent une anomalie négative en Eu bien visible (médiane  $Eu/Eu^* = 0,74$ ), ce qui

reflète l'effet de l'apatite, caractérisée par une anomalie négative en Eu (Figure 27 A ; Kieffer et al., 2023). Dans le diagramme multi-élément, les leucotroctolites, leucotroctolites à oxydes-apatite et troctolites nelsonitiques présentent des concentrations élevées en Ba, Sr bien que moins marqué que dans les anorthosites (Figure 28 A), indiquent la dominance de plagioclase. Elles présentent également des concentrations très élevées en P, confirmant une abondance significative d'apatite. Par ailleurs, les concentrations élevées en Ti et Nb témoignent de l'abondance de l'ilménite.

La webstérite se distingue par un enrichissement en ETR par rapport à l'orthopyroxénite et l'anorthosite (Figure 27 B). Cette signature géochimique s'explique par la dominance du clinopyroxène ( $\pm$  orthopyroxène), qui permet une incorporation accrue des ETR, en particulier des HETR qui se concentrent davantage dans les pyroxènes. La webstérite se caractérise par un léger appauvrissement en La et Ce ( $(La/Yb)_N = 0,55$ ), ce qui est caractéristique du clinopyroxène et une anomalie négative faible en Eu ( $(Eu/Eu^*) = 0,70$ ) indique l'absence de plagioclase. L'absence d'apatite (très faibles teneurs en  $P_2O_5$  : 0,03 wt. % ; Figure 27 H) aussi indique que les minéraux silicatés mafiques (clinopyroxène et orthopyroxène) contrôlent entièrement la distribution des ETRs dans cette lithologie. Dans le diagramme multi-élément, la webstérite partage plusieurs caractéristiques chimiques avec le dyke d'orthopyroxénite, notamment les faibles concentrations en Ba, K, Sr et Eu (Figure 28 B), reflètent les faibles proportions de plagioclase dans cette lithologie. Cependant, elle s'en distingue par un fort appauvrissement en P, confirmant l'absence de l'apatite. Les fortes concentrations en Zr suggèrent la présence du zircon non identifier en lame mince.

Le dyke d'orthopyroxénite se caractérise par un enrichissement en ETR par rapport aux anorthosites, mais moins important que celui de la webstérite (Figure 27 B). Il présente une pente plate entre les LETRs et les HETR ( $(La/Yb)_N = 1,85$ ) ainsi qu'une forte anomalie négative en Eu ( $(Eu/Eu^*) = 0,47$  ; Figure 26 B). Cependant, ce patron n'est pas typique de l'orthopyroxène, qui est généralement pauvre en ETR avec un léger enrichissement en HETR par rapport aux LETR. L'abondance de ETR ainsi que l'enrichissement relatif en LETR sont probablement liées à la présence d'une petite quantité d'apatite (0.74 wt. % de  $P_2O_5$ ) et de clinopyroxène (< 20 % modal). Dans le

diagramme multi-élément, le dyke d'orthopyroxénite se caractérise par de faibles concentrations Ba et K, Sr et Eu par rapport aux anorthosites (Figure 28 B) reflète la faible proportion du plagioclase dans cette lithologie. Ce dyke d'orthopyroxénite présente également des concentrations moyennes en P confirmant la présence d'une faible quantité d'apatite dans cette lithologie. Les faibles concentrations en Nb et Ti, indiquent la faible proportion d'ilménite dans cette lithologie.

Les lithologies anorthositiques contenant du pyroxène (leuconorite, leuconorite à oxydes-apatite, norite, norite à oxydes-apatite, leucogabbronorite, leucogabbronorite à oxydes-apatite, (gabbro)norite nelsonitique et (leuco)gabbronorite de Steve se caractérisent par un enrichissement en ETR par rapport aux anorthosites (Figures 27 C et D), expliqué par la présence de clinopyroxène et/ou orthopyroxène dans ces lithologies, qui concentrent ces éléments. Les lithologies contenant de l'apatite présentent des concentrations en ETR plus élevées. Ces lithologies anorthositiques contenant du pyroxène montrent un enrichissement en LETR par rapport aux HETR, avec une médiane du rapport  $(La/Yb)_N$  variant entre 1,7 et 6,8. Les leucogabbronorites et (leuco)gabbronorites de Steve montrent un enrichissement faible en HETR par rapport aux leuconorites, et les norites montrent l'effet du clinopyroxène dominant dans les leucogabbronorites et (leuco)gabbronorite de Steves. Les leuconorites, norites, leucogabbronorites et (leuco)gabbronorites de Steve présentent une très faible anomalie positive en Eu, avec une médiane  $Eu/Eu^*$  comprise entre 0,8 et 1,7. Cette faible anomalie positive reflète un effet combiné du plagioclase (riche en Eu), et des pyroxènes (très pauvres en Eu). Concernant les leuconorites à oxydes-apatite, norites à oxydes-apatite, leucogabbronorites à oxydes-apatite et la (gabbro)norite nelsonitique, elles présentent une faible anomalie négative en Eu (médiane  $Eu/Eu^*$  entre 0,7 et 0,91), ce qui s'explique par l'effet combiné de l'apatite, des pyroxènes (orthopyroxène et clinopyroxène ; anomalie négative) et des plagioclases (anomalie positive). Dans le diagramme multi-élément, les leuconorites, leuconorites à oxydes-apatite, leucogabbronorites et leucogabbronorites à oxydes-apatite se caractérisent par des concentrations élevées en Ba et Sr (Figure 28 C et D), par rapport aux norites, norites à oxydes-apatite, (gabbro)norites nelsonitiques et (leuco)gabbronorites de Steve, ce qui indique des proportions modales en plagioclase plus élevées. De plus, les lithologies à



oxydes-apatite et nelsonitiques montrent des concentrations en P, Ti et Nb très élevées, confirmant la présence de fortes proportions d'apatite et d'ilménite.

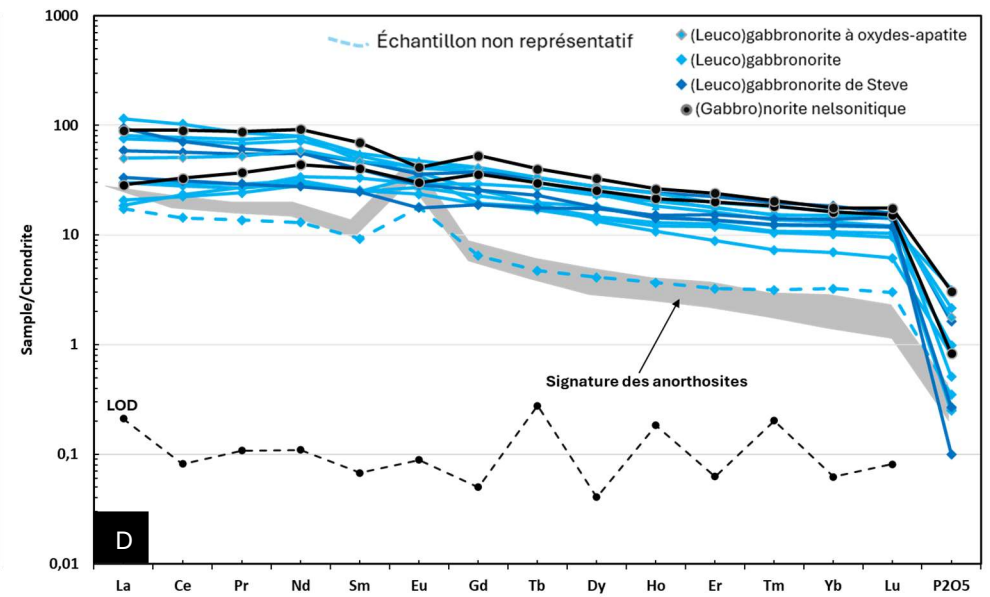
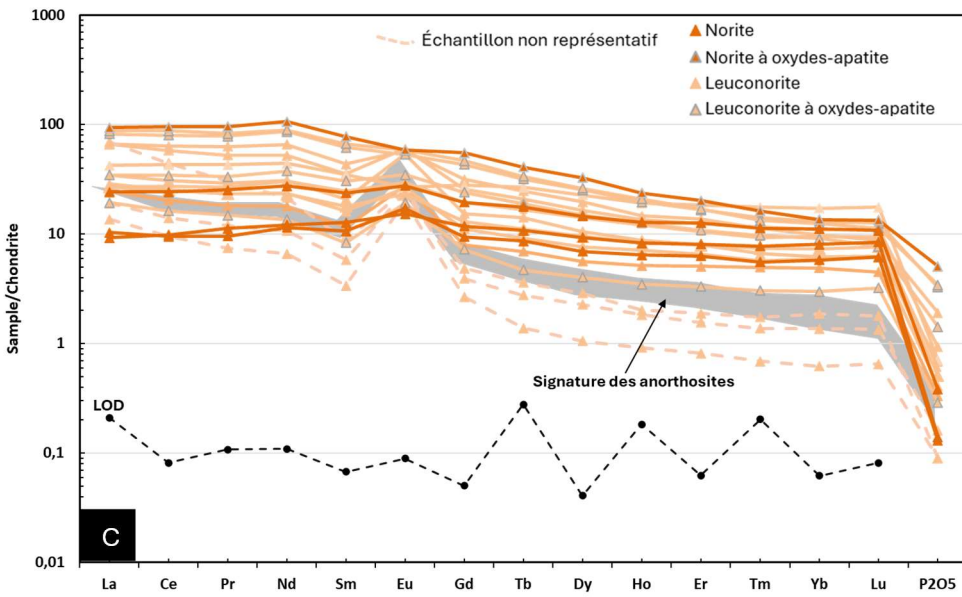
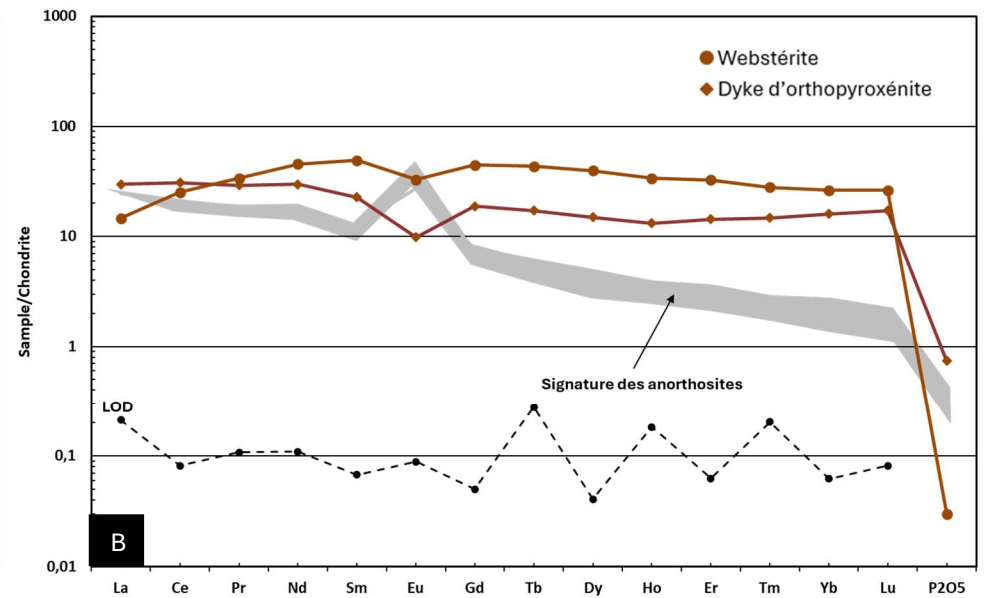
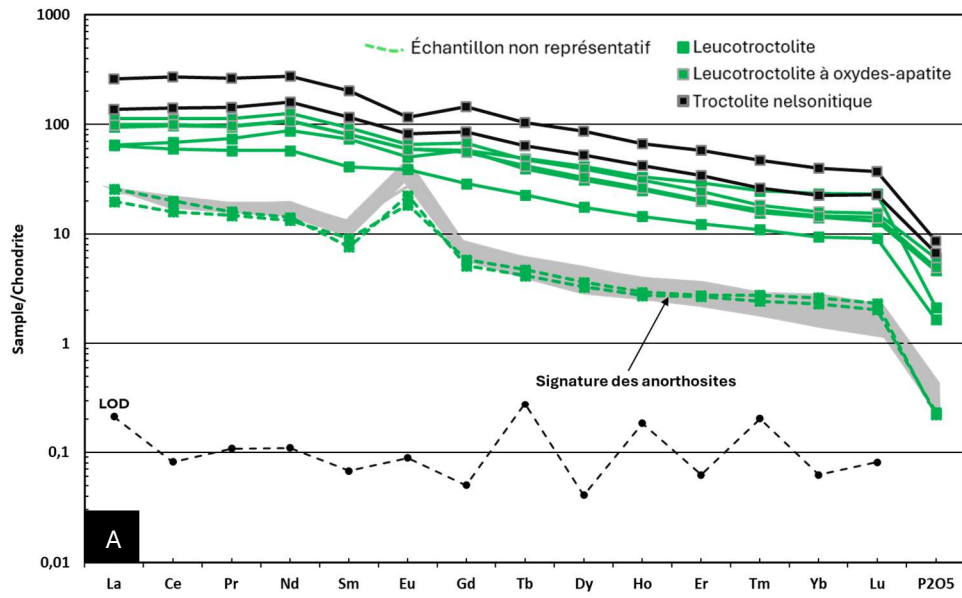


Figure 30: Compositions globales de différentes lithologies normalisées à la chondrite de McDonough et Sun (1995). A) Les leucotroctolites, les leucotroctolites à oxydes-apatite et les troctolites nelsonitiques ; B) Le dyke d'orthopyroxénite et la webstérite; C) Les (leuco)norites, les (leuco)norites à oxydes-apatite ; D) Les (leuco)gabbronorites, les (leuco)gabbronorites à oxydes-apatite, (leuco)gabbronorites de Steve et les (gabbro)norites nelsonitiques. (LOD : limite de détection).

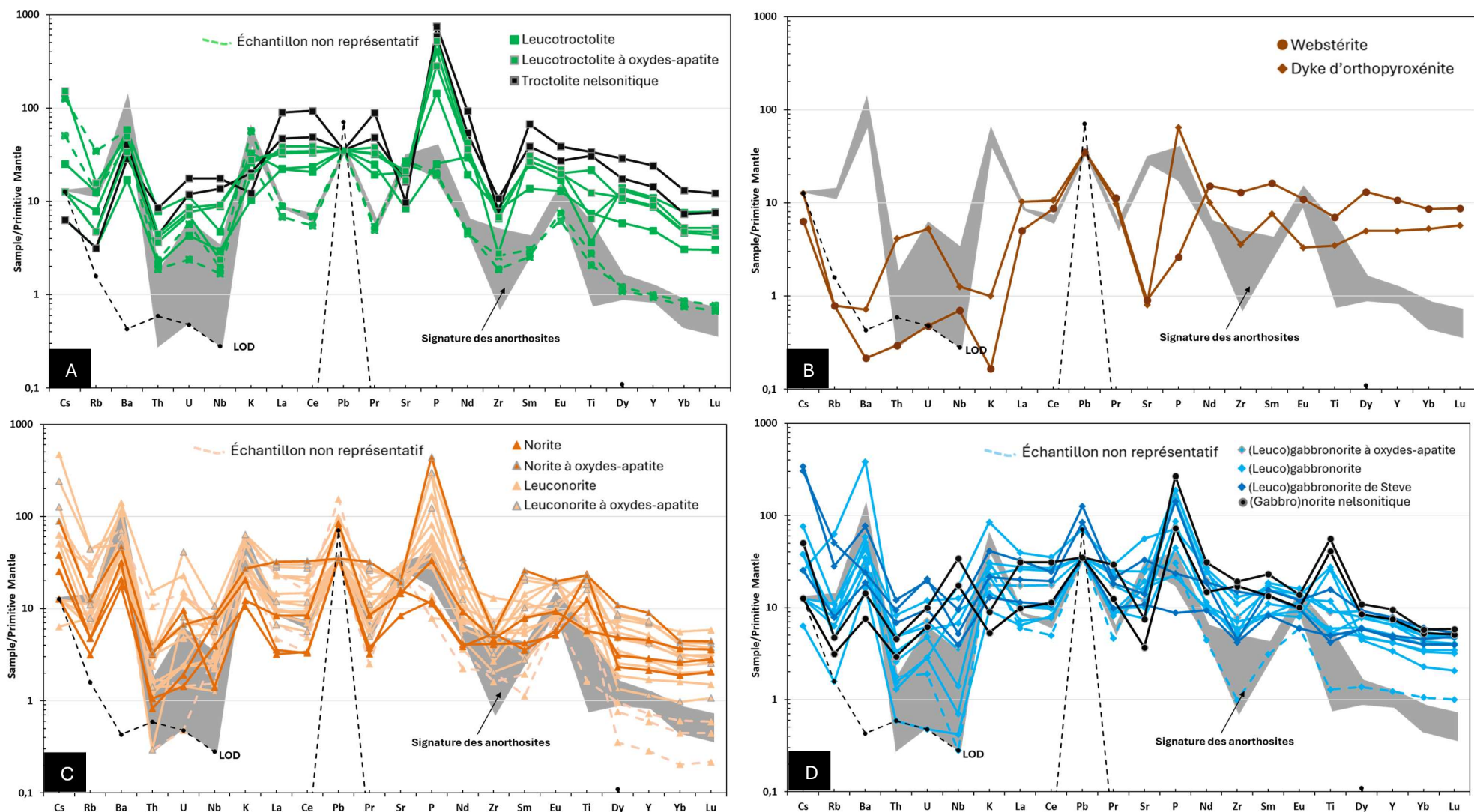


Figure 32 : Compositions globales de différentes lithologies normalisées au manteau primitif de Sun et McDonough (1989). A) Les leucotroctolites, les leucotroctolites à oxydes-apatite et les troctolites nelsonitiques ; B) Le dyke d'orthopyroxénite et la webstérite ; C) Les (leuco)norites, les (leuco)norites à oxydes-apatite ; D) Les (leuco)gabbronorites, les (leuco)gabbronorites à oxydes-apatite, (leuco)gabbronorites de Steve et les (gabbro)norites nelsonitiques. (LOD : limite de détection).

### 8.3.2. Éléments chalcophiles

Afin de mieux comprendre la distribution des métaux dans les roches étudiées, nous avons représenté les concentrations en Ni (Figure 29 A), Co (Figure 29 B), et Cu (Figure 29 C) et (ppm) dans des diagrammes binaires en fonction du soufre totale (S wt. %). Cette approche permet d'évaluer l'influence des sulfures sur l'enrichissement en métaux. Pour les éléments dont la concentration est inférieure à la limite de détection ( $< LOD$ ), une valeur équivalente à 0,5 fois la LOD a été attribuée. La limite de détection est également représentée sur les diagrammes.

Ces diagrammes (Figure 29) montrent que le Cu et le Co se corrélaient bien avec le S (wt. %), présentant une corrélation positive. Le Ni se corréla également positivement, mais cette corrélation est moins évidente que pour le Cu et le Co. Une telle tendance suggère un contrôle minimal des phases silicatées pour le Cu et le Co, ainsi qu'un contrôle exclusif des phases sulfurées sur leur distribution. En revanche, la distribution du Ni semble être légèrement influencée par les phases silicatées (pyroxène et olivine).

Les minéralisations en sulfures sont les plus riches en Ni (2820 - 9020 ppm), Cu (2310 - 11400 ppm), Co (323 - 1210 ppm) et soufre (10,8 - 27,5 wt. %). Dans les lithologies anorthositiques, les anorthosites sont les plus pauvres en Ni (2 - 3,6 ppm), Co (1 - 2 ppm) et Cu (5,5 - 7,8 ppm), et présentent une teneur en soufre très faible (0,005 - 0,02 wt. %), à l'exception d'un échantillon d'anorthosite (24-OB-7008-A1) qui présente des concentrations élevées en Ni (285 ppm), Co (90 ppm) et Cu (487 ppm), et une concentration en soufre de 5,5 wt. %.

Les leucotroctolites, y compris les leucotroctolites à oxydes-apatite, et les troctolites nelsonitiques sont les plus riches en Ni (21,9 - 144 ppm), Co (21 - 103 ppm), et pauvres en Cu (4,5 - 22,4 ppm), et présentent des teneurs en soufre entre 0,01 et 0,31 wt. %. Les lithologies à orthopyroxène (leuconorites, y compris les leuconorites à oxydes-apatite) présentent des concentrations faibles en Ni (4,3 - 485 ppm) et Co (4 - 96 ppm), et présentent des teneurs en soufre entre 0,005 et 2,72 wt. %, mais elles sont les plus riches en Cu (6,3 - 385 ppm). Les leucogabbro-norites, les leucogabbro-norites à oxydes-apatite et les (gabbro)norites nelsonitiques sont généralement faiblement plus riches en ces métaux par



rapport aux lithologies à orthopyroxène et présentent des concentrations en Ni entre 23,9 et 87,1 ppm, entre 13 et 68 ppm pour le Co, entre 8,6 et 62,2 pour le Cu, et entre 0,02 et 0,3 wt. % pour le S. Les (leuco)gabbronorites de Steve ont des concentrations faibles en Ni (14,8 - 87,1 ppm), Co (73,3 - 78,4 ppm) et Cu (8,9 - 62,2 ppm), et présentent une concentration en S entre 0,02 et 0,3 wt. %.

Le dyke d'orthopyroxénite, qui est l'hôte de la minéralisation en Ni-Cu à Léo-Charl, présente des concentrations un peu élevées en Ni (178 ppm), Co (93 ppm), et relativement très élevées en Cu (502 ppm) pour sa faible concentration de S (0,18 wt. %). Quant à la webstérite, elle présente des concentrations moyennes en Ni (79,5 ppm) et Co (47 ppm), faibles en Cu (11,2 ppm), et une concentration en S de 0,02 wt. %.

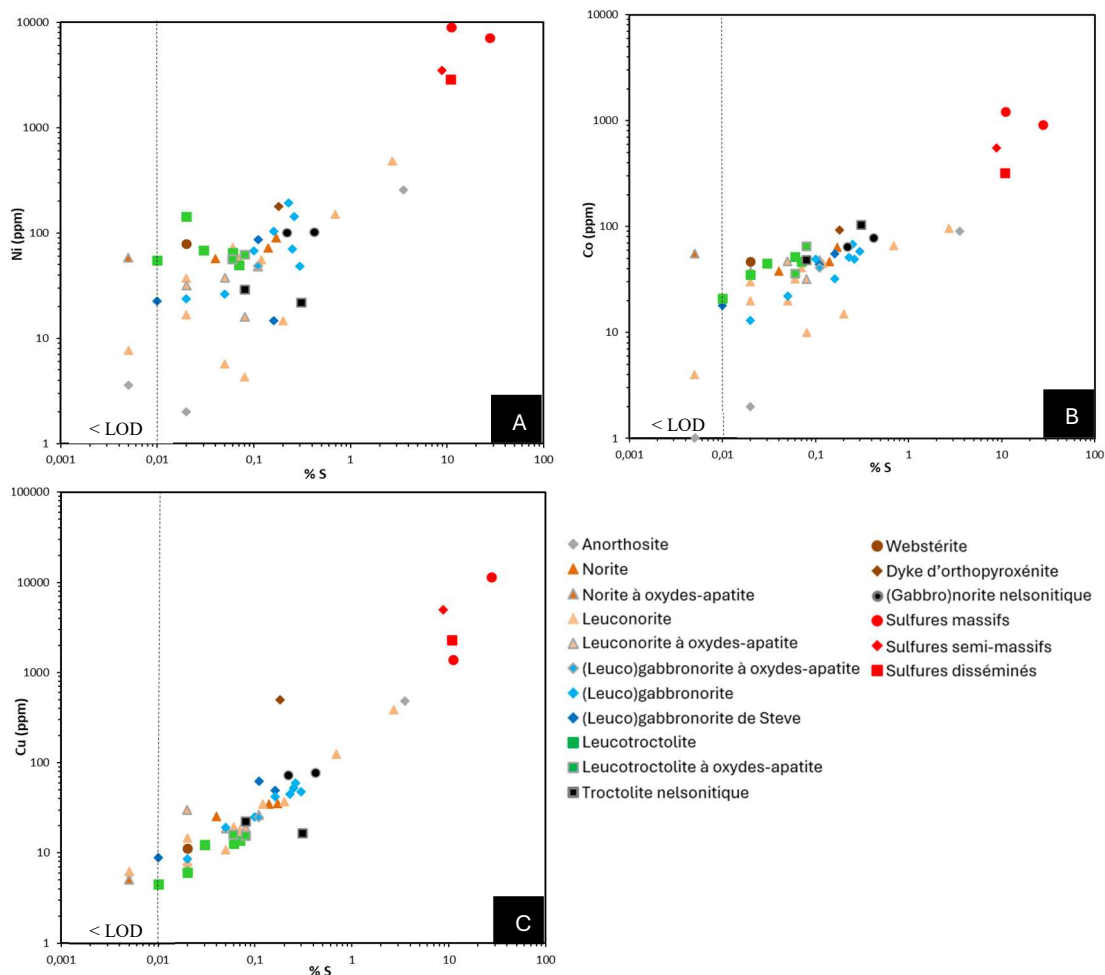


Figure 33 : Diagrammes binaires d'éléments chalcophiles en fonction du S pour les lithologies anorthositiques et sulfures. A) Ni vs S; B) Co vs S; C) Cu vs S. (LOD : limite de détection).

Le sélénium (Se) est un élément chalcophile moins abondant dans les roches sédimentaires que dans celles dérivées du manteau (Eckstrand et Hulbert, 1987). En raison de cette différence, le rapport S/Se est couramment utilisé pour tracer l'origine du soufre dans les dépôts magmatiques, notamment lorsque l'assimilation des roches encaissantes est suspectée dans la formation de la minéralisation (Paktunc, 1989).

Dans le cas des sulfures de Léo-Charl, les concentrations en Se sont inférieures à la limite de détection ( $< \text{LOD} = 3 \text{ ppm}$ ), à l'exception d'un échantillon de sulfures massifs ( $\text{Se} = 10 \text{ ppm}$  ; 24-OB-7032-C2). Pour la réalisation des diagrammes, une valeur de  $\text{LOD} \times 0,5$  a été prise en considération.

Dans le diagramme Pd + Pt (ppm) vs S/Se (Figure 30), les sulfures massifs ont des rapports S/Se moyennes compris entre 11000 et 183334, semblables à ceux des paragneiss de Duluth (Theriault et al., 1987) et présentent des teneurs en Pd + Pt faibles (0,03 - 0,08 ppm). Les sulfures semi-massifs présentent un rapport S/Se élevé (58600), et des teneurs en Pd + Pt très faibles (0,0 ppm), tandis que les sulfures disséminés affichent le rapport le plus élevé (72000), et des teneurs en Pd + Pt faible (0,03 ppm). Toutes ces valeurs de rapport S/Se sont supérieures à celles du manteau (2850 à 4350 ; Eckstrand et Hulbert, 1987) suggérant que la contamination crustale a joué un rôle important dans la formation de la minéralisation en Ni-Cu à Léo-Charl.

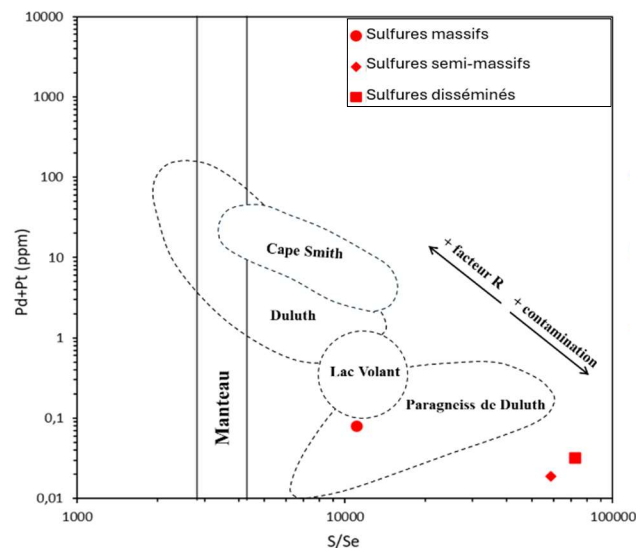


Figure 36: Diagramme S/Se vs Pd+Pt illustrant la position des sulfures par rapport à ceux issus d'autres gisements. Les effets d'une augmentation du facteur R et d'une contamination accrue du magma sont indiqués par des flèches (modifié d'après Nabil, 1999 et références therein). (LOD : limite de détection).

## 9. Discussion et conclusion

La présente étude révèle de nouveaux aspects de la géologie de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, et plus spécifiquement de la région du Lac à Paul, où plusieurs indices de sulfures de Ni-Cu ont été identifiés (Léo-Charl, Nourricier et MHY).

La cartographie indique que le secteur est dominé par des faciès riches en orthopyroxène, notamment la leuconorite et la norite, avec ou sans oxydes d'apatite. La présence mineure de leucotroctolite, d'anorthosite, de webstérite et de faciès nelsonitiques suggère une certaine diversité magmatique, potentiellement liée à une différenciation fractionnée. La prédominance de la (leuco)gabbro norite à grains fins dans la partie est du secteur (Gabbro de Steve), accompagnée d'enclaves de leuconorite, d'orthogneiss charnockitique et d'injections de monzonite, suggère la mise en place d'un magma tardif, plus jeune, ayant subi une contamination crustale significative. L'occurrence d'un dyke d'orthopyroxénite recoupant la norite à Léo-Charl semble jouer un rôle dans la localisation des minéralisations en Ni-Cu.

La richesse des lithologies du secteur (mPlsj1, 2, 3 et 6) en apatite (1 - 20 %) et en oxydes de fer (1 - 25 %), avec une dominance de l'ilménite sur la magnétite, ainsi que les fortes concentrations en  $P_2O_5$  (0,03 - 8,5 wt. %), suggèrent une évolution avancée du magma à l'origine des roches du secteur du Lac à Paul. Cette hypothèse est renforcée par la géochimie : la composition évoluée du plagioclase ( $An_{38-51}$ ) et la faible teneur en Ni des leucotroctolites soutiennent l'idée d'un magma différencié.

Les observations pétrographiques révèlent des grains de sulfures magmatiques (Pyrrhotite, Chalcopyrite,  $\pm$  Pentlandite, Pyrite) dans divers faciès anorthositiques, ce qui indique la coexistence de deux phases immiscibles, une silicatée et une sulfurée. Cette séparation a pu favoriser la formation de lentilles de sulfures, comme celles observées à Léo-Charl, où la minéralisation en Ni-Cu est spatialement associée au dyke d'orthopyroxénite et à la norite.

Les structures observées dans le secteur d'étude révèlent une déformation complexe et polyphasée affectant les lithologies anorthositiques. La foliation, largement développée,

traduit une déformation ductile régionale, avec une orientation variable selon les domaines structuraux.

Les données XRFp obtenues sur les différentes marges de la SALSJ suggèrent des variations significatives des teneurs en Sr au sein des plagioclases. Les marges nord et ouest se distinguent par des teneurs faibles (0,02 à 0,11 % ; Gueye, 2023 ; cette étude), tandis que les marges sud et est présentent des teneurs modérées à élevées, mais comparables entre elles (0,08 à 0,23 % ; Katako Diyoyo et al., 2024 ; Diyoyo et al., 2025). Cette distribution suggère des magmas distincts : des magmas pauvres en Sr pour les marges nord et ouest, et des autres plus enrichis pour les marges sud et Est. À l'échelle locale, dans le secteur étudié, la distribution spatiale des valeurs de Sr permet de distinguer deux populations. La première, majoritaire, montre des concentrations en Sr faibles (0,06 à 0,08 %) à l'ouest et à l'Est. La seconde, plus localisée, présente des concentrations en Sr plus élevées (jusqu'à 0,11 %) concentrées au centre du secteur dans le corridor de la faille Pamouscachiou. Cela suggère un épisode magmatique distinct, associé à une remontée le long de la faille de Pamouscachiou.

À Léo-Charl, la minéralisation prend la forme de petites lentilles de sulfures au sein de la norite, et au cœur d'un dyke d'orthopyroxénite qui recoupe cette norite. La minéralisation est dominée par la pyrrhotite, accompagnée de chalcopryrite et de pyrite, avec des traces de pentlandite généralement observées en exsolution dans la pyrrhotite. Les concentrations sont entre 2880 et 9020 ppm Ni, entre 1380 et 11400 ppm Cu et demeurent faibles en EGP (< 80 ppb pour Pd et < 17 ppb pour Pt). L'analyse géochimique, notamment à travers le diagramme Pd + Pt (ppm) vs S/Se, met en évidence l'influence de la contamination crustale dans la genèse de ces minéralisations.

En conclusion, l'ensemble des données structurales, pétrographiques et géochimiques souligne une évolution magmatique complexe au sein de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. Les travaux futurs, notamment l'étude des carottes de forage des indices de Nourricier et MHY, permettront d'affiner ces interprétations et de mieux contraindre les mécanismes à l'origine de la minéralisation.



## Références

Ashwal, L.D. (1993). Anorthosites. In: Minerals and Rocks, 21. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 422.

Ashwal, L. D., et Wooden, J. L. (1983). Sr and Nd isotope geochronology, geologic history, and origin of the Adirondack anorthosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(11), 1875-1885.

Barnes, S.-J., Couture, J.-F., Sawyer, E. W., et Bouchaib, C. (1993). Nickel-Copper occurrences in the Belletierre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting Platinum-Group Element Distributions. *Economic Geology*, 88: 1402-1418.

Boivin, M. et Paré, P. (2002). Levé électromagnétique transitoire de type "SIROTEM", projet Chute-des-Passes (1279) (GM 60717), 24.

Block, M., Lalancette, J. et Girard, R. (2010). Drilling program, Lac Yenevac project (GM 65346). IOS Services Géoscientifiques inc, 167.

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

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

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

Daigneault, R., Gobeil, A. et Hébert, C. (1999). Chevauchement et décrochements grenvilliens : comparaison des styles structuraux des secteurs Manitou, Manicouagan et

Chicoutimi. Programme et résumés 1999. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, DV 99-03, 28.

Depatie J. (1971). Report on Chute des Passes properties (GM 27034), 12.

Dion, D.J., et Dumont, R. (1994). Données numériques mailles du champ magnétique total résiduel, territoire du Québec. Ministère des Ressources naturelles, Québec, MB 94-08X.

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. Ministère des Ressources naturelles, Québec, MB-2025-xx, 21.

Duplessis, C., et Tremblay, H. (2024). Graal Nickel & Copper Project, Saguenay-Lac-St-Jean, Quebec, Canada. Prepared for Canada Silver Cobalt Works Inc. (CCW) and Coniagas Battery Metals Inc., January 17, 2024, 121.

Eckstrand, O.R., et Hulbert, L.J. (1987). Selenium and the source of sulfur in omagmatic nickel and platinum deposits. Geological Association of Canada. Mineralogical association of canada, program with abstracts, 12, 40.

Francoeur G. (1998). Rapport des travaux 1997, projet Chute-des-Passes. Amaruk pour le compte des Mines d'Or Virginia Ltée, 43.

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. Université du Québec à Chicoutimi, 294.

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.

Gower, C., Kamo, S., et Krogh, T. (2008). Indentor tectonism in the eastern Grenville Province. Precambrian Research 167, 201-212.

Hassen Ali, T., Simard, R., Dare, S., et Moukhsil, A. (2023). Contexte géologique des minéralisations de Ni-Cu  $\pm$  Co et de Fe-V-Ti-P de la marge ouest de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. UQAC, MRNF, 2023-2008.

Hassen Ali, T., Simard, R., Dare, S., et Moukhsil, A. (2024). Cartographie pétrogéochimique par XRF portative de la marge sud de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (secteur St-Bruno-Arvida) et des minéralisations de Fe-Ti-VP associées, Province de Grenville central, Québec. UQAC, MRNF, 2024-07, 65.

Hébert, C. 1997. Géologie et compilation de la région de Chicoutimi (22D). Ministère des Ressources Naturelles du Québec, carte SI-22D-G2P-97K.

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

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

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

Hébert, C., et Van Breemen, O. (2004). Mesoproterozoic basement of the Lac St. Jean Anorthosite Suite and younger Grenvillian intrusions in the Saguenay region, Québec: structural relationships and U-Pb geochronology. Memoirs-Geological Society Of America, 65-80.

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

Hébert, C., et Beaumier, M. (2000b). Géologie de la région de Chute-des-Passes. Ministère des Ressources Naturelles, Québec; Carte annotée : SI-22E14-C3G-00K.

Hébert, C., et Van Breemen, O. (1999). Emplacement of the Lac-St-Jean Anorthositic Suite, Grenville Province, Canada. In *Journal of Conference Abstracts, European Union of Geosciences*, vol. 4, no. 1, 687.

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

Hébert, C., et Van Breemen, O., Cadieux, A.-M., Gosselin, C. (2009). Région du réservoir Pimpuacan, (SNRC 22E): synthèse géologique. *Ressources naturelles et faune Québec*, 60.

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

Higgins, M. D., 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., et Van Breemen, O. (1996). Three generations of anorthosite-mangérite-charnockite-granite (AMCG) magmatism, contact metamorphism and tectonism in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region of the Grenville Province, Canada. *Precambrian Research*, 79 (3-4), 327-346.

Huss, L. (2002). Caractérisation de la minéralisation en Ni-Cu-EGP des indices de la région du Lac à Paul, suite anorthositique de Lac St-Jean. *Université du Québec à Chicoutimi*, 232.

Indares, A. (2020). Deciphering the metamorphic architecture and magmatic patterns of large hot orogens: Insights from the central Grenville Province. *Gondwana Research*, 80, 385-409.



Katako Diyoyo, J., Simard, R-L., Dare, S., et Moukhsil, A. (2024). Cartographie de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) dans le secteur des minéralisations de Fe-Ti-VP du corridor de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche. MB 2024-08. Ministère des Ressources naturelles et des forêts, 37.

Kieffer M. A., Dare, S.A.S., et Namur, O. (2023). The use of trace elements in apatite to trace differentiation of a ferrobaltic melt in the Sept-Iles Intrusive Suite, Quebec, Canada: Implications for provenance discrimination, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 342, 169-197.

Laurin, A.F., et Sharma, K.N.M. (1975a). Carte Réservoir Pipmuacan (1783). Service de l'exploration géologique, Québec.

Laurin, A.F., et Sharma, K.N.M. (1975b). Région des rivières Mistassini, Péribonca, Saguenay (Grenville 1965-1967). Ministères des Richesses naturelles, R.G.-161, Québec, 1-89.

Lévesque S. (1999). Rapport des travaux 1998, projet Chute-des-Passes (GM 56578), 84.

McDonough, W.F. et Sun, S.S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3), 223-253.

Mercier, F. (2022). Répartition spatiale des faciès de la Suite d'anorthosite du Lac-St-Jean: implications pour exploration minérale, Projet de fin d'études, UQAC, 48.

Miloski G. P. (2023). Geochemical variation of oxide-apatite mineralization associated with Proterozoic massif-type anorthosites in the Central Grenville Province, Quebec, Canada. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 497.

Mountain, B. (1988). Summary report on geological mapping and trenching on the whitefish lake property (GM 48809). Flanagan McAdam & Co, 40.

Mountain, B. (1989). Report on geology, geophysics and exploration drillin, Mc Nickel property (GM 49672). Mc Nickel Inc, 1007.

Nabil, H. (1999). Caractérisation de la minéralisation en Ni-Cu-Co de l'indice de Lac-Volant, région de Sept-Îles, Québec (M.S. thesis): Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, 189.

Naldrett, A., Keats, H., Sparkes, K., et Moore, R. (1996). Geology of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 2(5), 169-179.

Ouellet, R. (2014). Rapport des travaux sur la propriété KM 50, été 2012 (GM68267), 76.

Paktunc, A.D. (1989). Petrology of the St. Stephen intrusion and the genesis of related nickel-copper sulfide deposits. *Economic Geology*, 84: 817-840.

Peck, D.C., et Keays, R.R. (1990). Insights into the behavior of precious metals in primitive S-undersaturated magmas: Evidence from the Heazlewood River Complex, Tasmania. *Canadian Mineralogist*, 28: 553-577.

Poirier, M., et Granger, B. (1997). Levés magnétométriques et d'EMH-MaxMin. Grilles Nourricier A et B, MHY-A, Manouane et Paul (S.N.R.C 22 E/15). GM 56024, 18.

Rivers, T. (1997). Lithotectonic elements of the Grenville Province: review and tectonic implications. *Precambrian Research*, 86(3-4), 117-154.

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

Rivers, T. (2015). Tectonic setting and evolution of the Grenville Orogen: An assessment of progress over the last 40 years. *Geoscience Canada*, 42(1), 77-124.

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

Roy I. (2001a). Rapport sur la campagne de forage juin 2000, projet Chute-des-Passes 1279. GM 58807, 191.

Roy I. (2001b). Rapport sur la campagne de forage octobre 2000, secteur MHY, projet Chute-des-passes 1279. GM 58815,170.

Roy I. (2001c). Rapport sur la campagne de forage, avril 2003, secteur MHY, projet Chute-des- passes 1279. GM 60730, 37.

Ryan, B., Wardle, R., Gower, C., Nunn, G. (1995). Nickel-copper sulphide mineralization in Labrador: The Voisey's Bay discovery and its exploration implications. *Current Research*, 95-91.

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)*, 73.

Tremblay, P. et Girard, R. (2011). Exploration project, poissons blancs (Mc Nickel) (Rapport de travaux). IOS Services Géoscientifiques inc.

Tremblay, C. (2007). Résumé des visites de la découverte de nickel et cuivre sur la propriété MISTASS (KM 50), GM61167, 4.

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

Vaillancourt, C. (2001). Étude géochimique et économique de la suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami, Saguenay-Lac-St-Jean, Québec. *Université du Québec à Chicoutimi*, 202.

Van Breemen, O. (2009). Report on U-Pb geochronology for the Pimpuacan Reservoir region. *GSC contribution (20080416)*,13.

Woodruff, L. G., Nicholson, S. W., et Fey, D. L. (2013). A deposit model for magmatic iron-titanium-oxide deposits related to Proterozoic massif anorthosite plutonic suites 2328-0328.

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*, 343-350, 76.