

MB 2023-17

Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de terrain

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

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 



Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de terrain

Marc Legault, Sarah Auclair et Miguel Bournissout-Cottel

MB 2023-17

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.

PU-2021-08-1384

**Travaux de recherche sur
les minéraux critiques et
stratégiques réalisés par les
stagiaires de l'École de terrain**

Pour :

M^{me} Andrea Amortegui
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
Direction de l'acquisition des connaissances géoscientifiques
5700, 4^e Avenue Ouest, local D-307
Québec (Québec) G1H 6R1

Par :

Marc Legault, Ph. D.

Avec la collaboration de :

Sarah Auclair
Miguel Bournissout-Cottel



Unité de recherche et de service en technologie minérale

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819-762-0971, poste 2558 | Télécopieur : 819-797-4727

Novembre 2023

RÉSUMÉ

Ce rapport présente une synthèse des travaux pétrographique et géochimique des échantillons de 2021 et de 2022 pour le projet sur les pegmatites lithinifères du secteur du lac Simard dans le nord du Témiscamingue (Legault et al., 2022; Legault, 2023), et des échantillons de 2019 de Valdenaire (2019) pour le projet sur les carbonatites à éléments de terres rares (ÉTR) du secteur du lac Cameron dans la région de Lebel-sur-Quévillon.

Dans le secteur au nord du lac Simard, plusieurs pegmatites montrent des minéralisations en minéraux critiques et stratégiques en association spatiale avec le Batholite du Réservoir Decelles (BRD). Notre traitement des données géochimiques ainsi que la chimie des grenats et des colombo-tantalites a permis de démontrer une évolution magmatique des granites du BRD vers les pegmatites du BRD vers les pegmatites NYF et puis vers les pegmatites LCT. L'étude sur le spodumène a révélé une tendance prononcée de celui-ci à subir une altération ou une transformation coronitique, mais surtout une altération le long de ses plans de clivage, généralement en muscovite.

Au lac Cameron les échantillons de 2019 ont été préparés sous forme de onze (11) lames minces observées au microscope optique, tandis que 15 échantillons ont été envoyés à l'analyse chimique. Les analyses ont montré que l'ensemble des carbonatites du secteur sont des ferrocronatites avec des teneurs atteignant des valeurs de 6,7% ÉTR_{total} et de 3,5% Sr. Cependant, les carbonatites montrent peu ou pas d'enrichissement en Ba, Nb, Ta, Y et Sc. La fénitisation de la roche encaissante est très limitée. La compilation des travaux antérieurs a conduit à l'identification de nouveaux affleurements qui seront examinés à l'été 2024.

Mots-clés : Pegmatite, lithium, Témiscamingue, carbonatite, éléments de terres rares, Lebel-sur-Quévillon

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	I
PRÉFACE	V
MÉTHODES DE TRAVAIL	V
LES MINÉRAUX CRITIQUES ET STRATÉGIQUES	VII
1. MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE DES PEGMATITES DU SECTEUR DU LAC SIMARD, RÉGION DU TÉMISCAMINGUE (M. BOURNISSOUT-COTTEL)	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	1
1.3 PROBLÉMATIQUE	4
1.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE	5
1.5 RÉSULTATS	8
1.6 CONCLUSION	24
1.7 RECOMMANDATIONS	24
2. ÉTUDE DES INDICES DE TERRES RARES DANS LES CARBONATITES DU SECTEUR DE LABEL-SUR-QUÉVILLON (S. AUCLAIR)	25
2.1 INTRODUCTION	25
2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	25
2.3 PROBLÉMATIQUE	28
2.4 MATÉRIEL ET MÉTHODE	30
2.5 CONCLUSION	38
2.6 TRAVAUX FUTURS	38
BIBLIOGRAPHIE	39

Liste des figures

Figure 1. Carte montrant les grands ensembles géologiques du Québec	vi
Figure 2. Carte géologique des suites magmatiques de l'Abitibi et du Pontiac	2
Figure 3. Géologie régionale du secteur nord du lac Simard sur fond d'image satellitaire montrant la localisation des divers échantillons utilisés dans cette étude	3
Figure 4. Schéma idéalisé d'un champ de pegmatites LCT	6
Figure 5. Boîtes à moustache montrant le pourcentage de feldspath potassique (FK), du plagioclase (PG) et du ratio $FK/(FK+PG) \times 100$ du Batholite du Réservoir Decelles et des pegmatites à l'intérieur de celui-ci ainsi que des pegmatites LCT et NYF	9
Figure 6. Distribution minéralogique (A) et des indices chimiques (B à D) à l'intérieur du BRD	10
Figure 7. Variations des ratios K/Rb, K/Cs, Mg/Li, Nb/Ta, Zr/Hf et ASI	13
Figure 8. Variation des compositions chimiques	15
Figure 9. Photographies de MEB et de MO de spessartines dans les pegmatites de type LCT et NYF	17
Figure 10. Graphiques réalisés à partir des données EDS de grenats des pegmatites de types LCT et NYF	18
Figure 11. Photographies de MEB de colombo-tantalite et de bétafite dans les pegmatites des types LCT et NYF ...	20
Figure 12. Graphiques à partir de données EDS de colombo-tantalite et de bétafite des pegmatites des types LCT et NYF.	21
Figure 13. Photographies de MEB et de MO de spodumènes dans les pegmatites de type LCT	23
Figure 14. Géologie régionale du secteur de Lebel-sur-Quévillon montrant la localisation des indices d'ÉTR (A) et la distribution et l'orientation des dykes/veines/fractures de carbonates-magnétite (B)	26
Figure 15. Illustrations montrant la répartition des ressources minérales selon les lithologies et les contacts géologiques des complexes alcalins à carbonatites.	29
Figure 16. Compilation des analyses géochimiques du secteur à l'étude montrant la localisation des valeurs de la somme des ÉTR supérieures à 1700 ppm.	31
Figure 17. Compilation des mesures de dyke/veine/fracture de carbonates-magnétite avec et sans pendage sur une rosace (A) et seulement celles avec pendage sur un stéréonet (B).	31
Figure 18. Carte des indices d'ÉTR du secteur de Lebel-sur-Quévillon réalisée à partir de la compilation.	33
Figure 19. Photomicrographies de veine de magnétite-carbonates et de fenites.	34
Figure 20. Photomicrographies des minéraux d'ÉTR.	35
Figure 21. Diagrammes chimiques des intrusions de carbonatite	37

Liste des tableaux

Tableau 1. Liste des MCS du Québec.	viii
Tableau 2. Valeurs limites des plutons sources (granite) et des dykes de pegmatite	6
Tableau 3 : Occurrences minérales des pegmatites LCT et NYF du lac Simard, estimées à la suite des observations au microscope optique, MEB et aux analyses EDS. (A) : Abondant ; (F) : Fréquent ; (R) : Rare ; (E) : Exceptionnel ; (-) Non observé.	11
Tableau 4. Estimation des pourcentages des minéraux identifiés dans chaque lame.	33

Liste des annexes

Annexe A. Cartographie détaillée des indices d'ÉTR par Valdenaire (2019).

PRÉFACE

Créée en 2008, l'École d'été en géologie de terrain, qui fut développée par l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), l'Université de Lorraine (UL) et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN), a permis d'accueillir à ce jour une centaine de jeunes diplômés d'ailleurs dans la Francophonie (France et Maroc). L'École vise à développer un savoir-faire très concret, au moyen d'exercices de terrain pratiques, encadrés par des professeurs de l'UQAT et de l'UL. Localisés au Québec, les stages de 4 mois, qui font partie intégrante de l'expérience, permettent aux participants de répondre à la forte demande de main-d'œuvre tant par les organismes gouvernementaux que par l'industrie minière et ainsi, les former aux pratiques nord-américaines.

Afin de donner des expériences de stage appliqué dans le domaine de l'évaluation du potentiel pour les minéraux critiques et stratégiques (MCS), l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) de l'UQAT, le MERN et Éléments08, le centre d'excellence sur les métaux stratégiques, ont lancé un projet de deux stages sur les MCS par année pour une durée de 4 ans. Cette année, les stages se sont déroulés du 23 mai au 25 août 2023 et ont porté sur la caractérisation minéralogique et chimique des pegmatites lithinifères dans le secteur du lac Simard au Témiscamingue (M. Bournissout-Cottel) et des carbonatites à éléments à terres rares (ÉTR) dans le secteur de Lebel-sur-Quévillon (S. Auclair) (*figure 1*). Ce rapport présente une synthèse de leurs travaux.

Méthodes de travail

Les stages ont été divisés en une première partie d'examen pétrographique et de traitement géochimique sur les échantillons récoltés à l'été 2021 et 2022 pour le secteur du lac Simard, et des échantillons de Valdenaire (2019) pour le secteur de Lebel-sur-Quévillon. De la caractérisation minéralogique par microscope électronique à balayage (MEB) avec spectromètre à énergie dispersive (EDS) a également été effectuée sur quelques pegmatites du secteur du lac Simard tandis que la compilation des analyses chimiques entamée par Valdenaire (2019) a été complétée pour le secteur de Lebel-sur-Quévillon. En raison des feux de forêt qui ont sévi à l'été 2023 dans ce dernier secteur et l'interdiction de travaux en forêt associée, il n'y a pas eu de travaux de terrain effectués sur les carbonatites au nord de Lebel-sur-Quévillon.

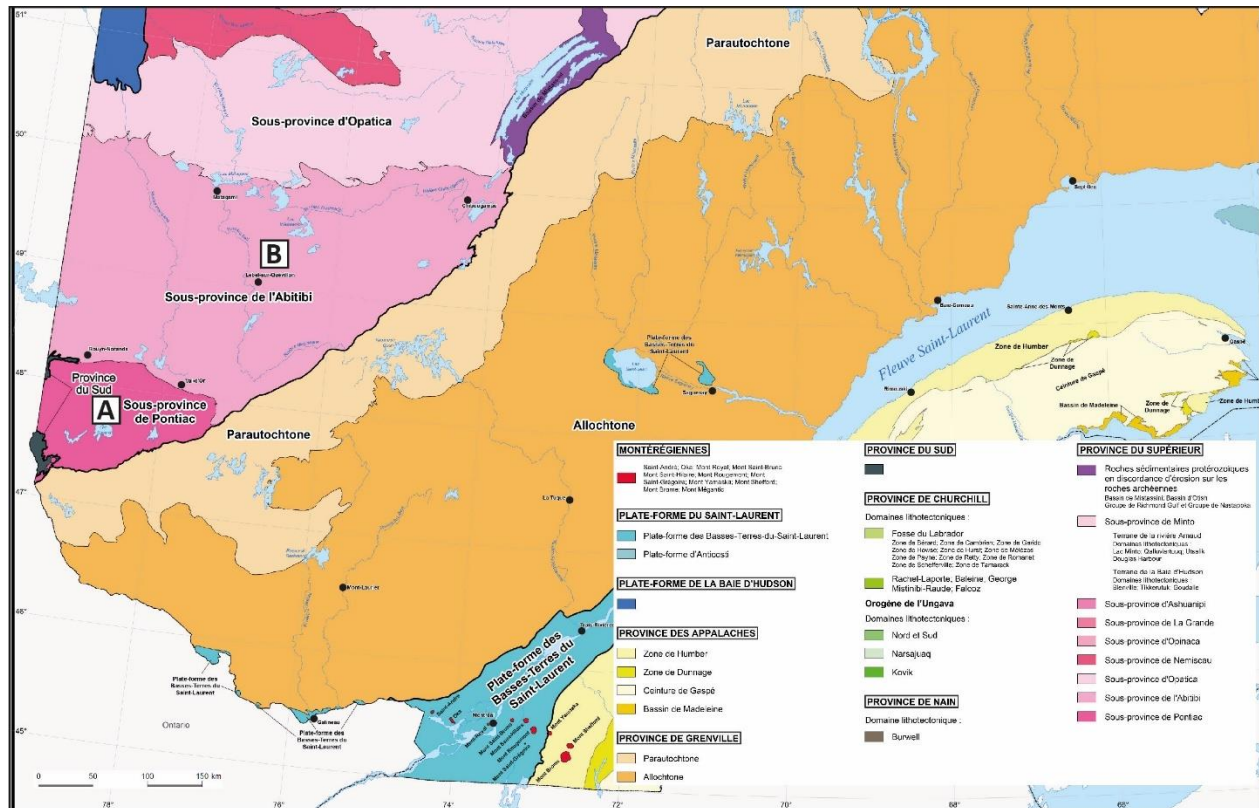


Figure 1. Carte montrant les grands ensembles géologiques du Québec avec la localisation des projets de stage. A – Lac Simard; B – Lebel-sur-Quévillon. Modifiée de MRNF (2023).

Afin de donner une expérience de terrain aux stagiaires, ceux-ci ont été impliqués dans les travaux de cartographie dans le secteur de Gatineau sur ou en périphérie du secteur couvert par I. Ait Bouallal dans son projet de maîtrise.

Les minéraux critiques et stratégiques

L'évolution actuelle des technologies entraîne une forte demande en ressources minérales. Certains de ces minéraux sont devenus indispensables et jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne (nouvelles technologies, énergies vertes). Cependant, la production et la disponibilité de ces minéraux sont limitées. Dans ce contexte, le Québec, ainsi que plusieurs pays, ont défini une liste de MCS. Les minéraux critiques sont définis par le MERN comme des minéraux d'importance économique significative pour des secteurs clés de l'économie. Ces minéraux présentent un risque élevé sur le plan de l'approvisionnement et ne possèdent pas de substituts disponibles. Ces métaux critiques comprennent le cuivre, le zinc et le cadmium (MERN, 2020) (*tableau 1*). Les minéraux stratégiques, quant à eux, sont les minéraux nécessaires à la mise en œuvre des politiques économiques du Québec (Politique de mobilité durable, Plan pour une économie verte). Ces métaux stratégiques incluent notamment le lithium, le cobalt, les ÉTR et le graphite (MERN, 2020) (*tableau 1*).

Tableau 1. Liste des MCS du Québec. Tiré de MERN (2020)

Critiques	Stratégiques	Stratégiques
Nécessaires à l'approvisionnement d'usines québécoises de transformation	Liés aux politiques publiques et aux énergies renouvelables	Produits ou ayant un bon potentiel de mise en valeur au Québec
1. Antimoine ²	11. Cobalt ²	17. Magnésium ⁴
2. Bismuth ²	12. Éléments des terres rares (ETR)	18. Niobium ¹
3. Cadmium ²	13. Éléments du groupe du platine (EGP ²)	19. Scandium ⁴
4. Césium	14. Graphite (naturel)	20. Tantale
5. Cuivre ²	15. Lithium ³	21. Titane ¹
6. Étain ²	16. Nickel ¹	22. Vanadium ³
7. Gallium ²		
8. Indium		
9. Tellure ²		
10. Zinc ¹		

¹ : Produit transformé comme substance principale.

² : Produit comme substance secondaire, à partir de concentré ou comme sous-produit de fonderie.

³ : Projet de mise en valeur minière.

⁴ : Projet de transformation.

1. Minéralogie et géochimie des pegmatites du secteur du lac Simard, région du Témiscamingue (M. Bournissout-Cottel)

1.1 Introduction

Cette section du document présente un résumé des travaux effectués dans le cadre du stage Master 2 sur la minéralogie et la géochimie des pegmatites du secteur nord du lac Simard, dans la région du Témiscamingue. L'objectif est de déterminer si une relation génétique existe entre le Batholithe du Réservoir Decelles et les pegmatites minéralisées LCT (Li-Cs-Ta) et NYF (Nb-Y-F).

1.2 Contexte géologique (*modifié de Legault et al., 2022*)

Le secteur à l'étude se situe à 70 km au sud-sud-est de la ville de Rouyn-Noranda dans la Province du Supérieur, plus précisément dans la Sous-province du Pontiac (*figure 2*). Cette sous-province est constituée principalement de roches métasédimentaires et de roches métavolcaniques du Groupe de Pontiac, et de granitoïdes (Hocq et Verpaelst, 1994). Elle a subi un métamorphisme au faciès des amphibolites moyen à supérieur et présente des structures globalement E-W. Les derniers levés géologiques régionaux du secteur datent de plus de 45 années (Chagnon, 1968; Rive, 1975).

Les plutons présents dans la région sont généralement de composition granodioritique, monzogranitique et tonalitique (Hocq et Verpaelst, 1994). Dans le secteur étudié, on trouve notamment le Batholithe du lac Simard (BLS) et le Batholithe du Réservoir Decelles (BRD) (SIGÉOM, 2010a) (*figure 3*). Centré sur le lac Simard, on trouve le batholithe du même nom, composé de monzonite, monzodiorite, diorite et syénite (Tarnocai, 1997). Il est de nature alcaline (Feng et Kerrich, 1992) et est daté à 2686 Ma (Machado et al., 1991). Au nord du lac, on trouve le BRD, composé essentiellement de granite et de granodiorite (Rive, 1994). Il est peralumineux et montre une grande étendue d'âge entre 2615 et 2670 Ma (Feng et Kerrich, 1991; Mortensen et Card, 1993; Godet et al., 2023a,b).

Sur la rive nord du lac Simard, près du contact entre les deux batholites, se trouve une pléthore de

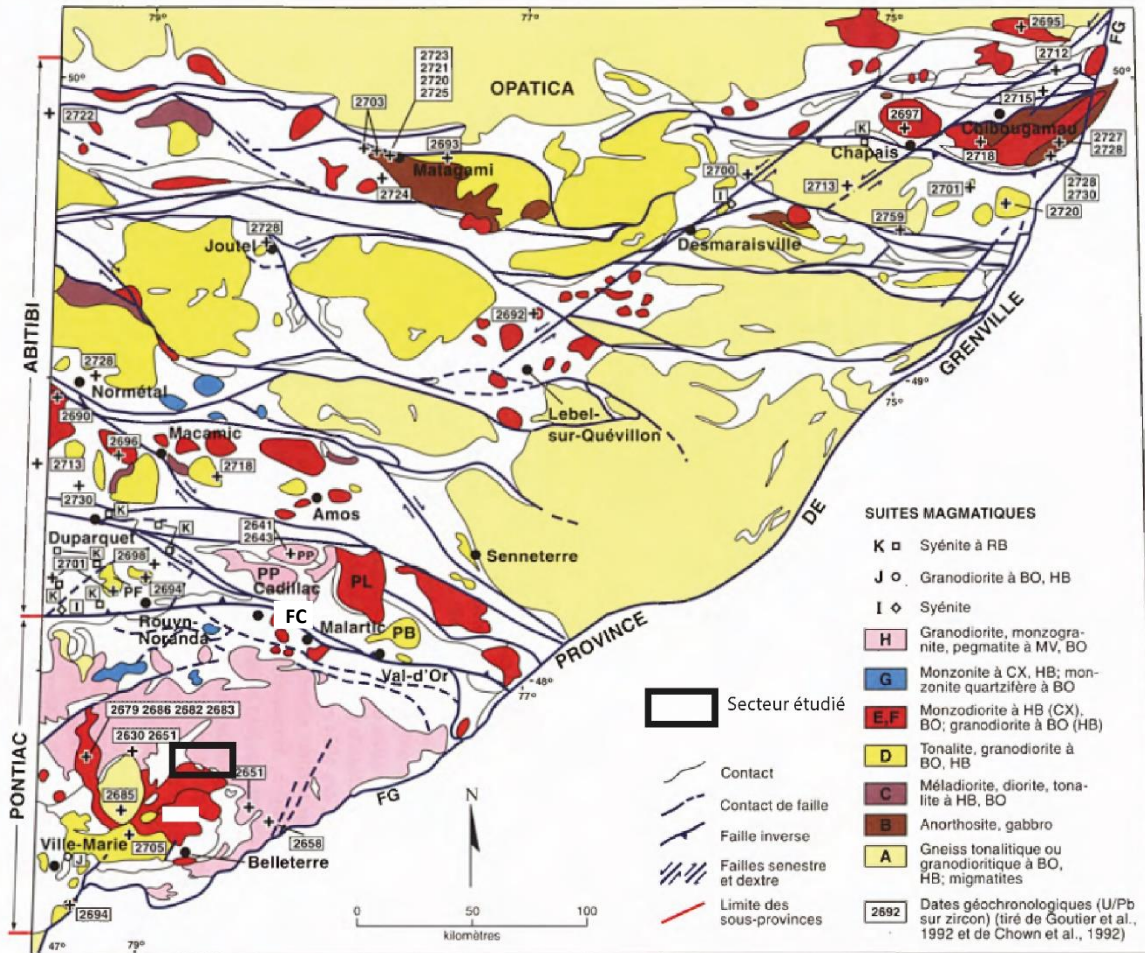


Figure 2. Carte géologique des suites magmatiques de l'Abitibi et du Pontiac de Hocq et Verpaest (1994).
 Plutons : PF : pluton de Flavrian ; PB : pluton de Bourlamaque ; PL : pluton de Lacorne ; PP : pluton de Preissac.
 Abréviations : BO : biotite ; CX : clinopyroxène ; HB : hornblende ; MV : muscovite ; RB : riebeckite. FG : Front de Grenville ; FC : Faille de Cadillac.

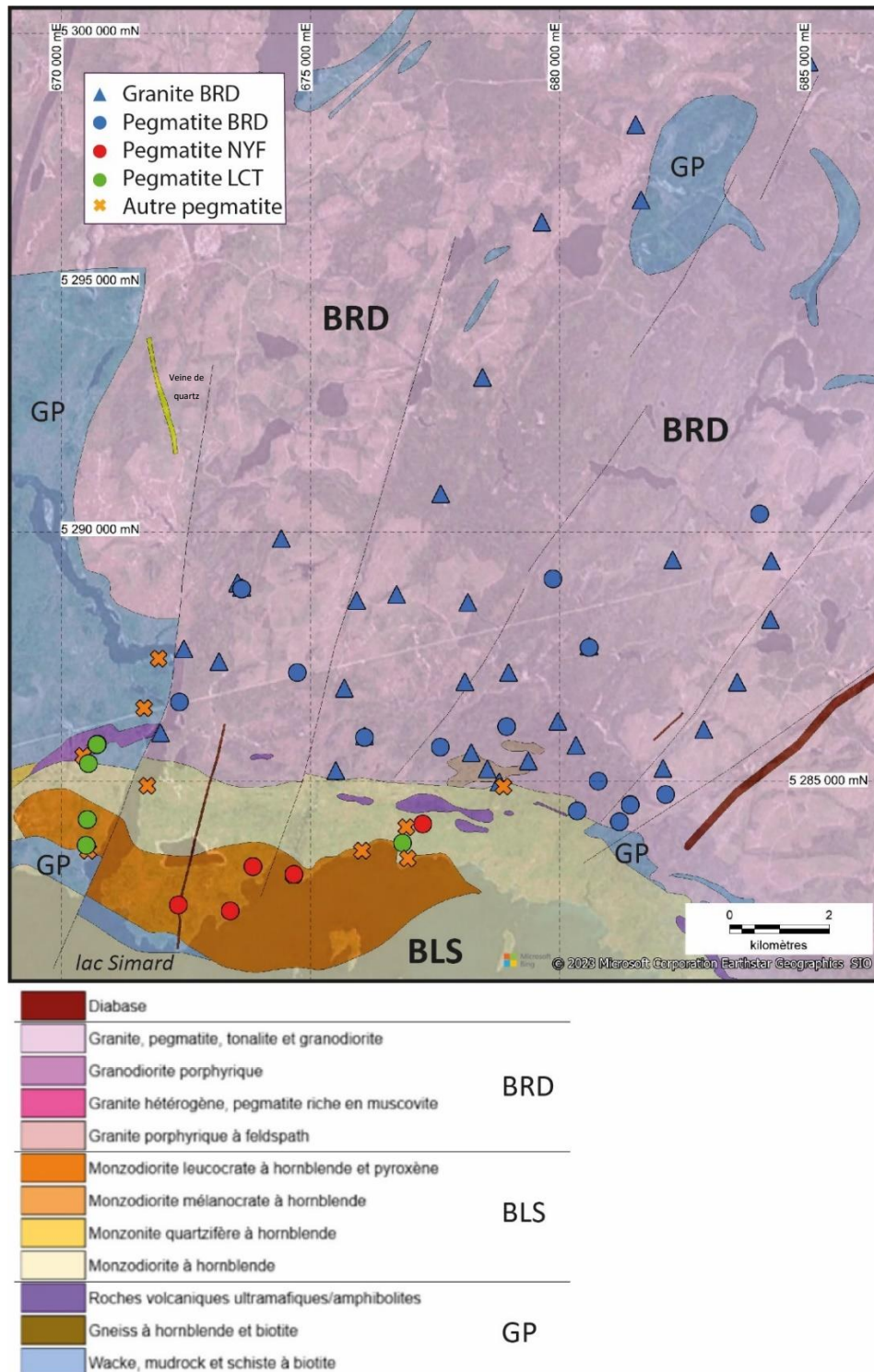


Figure 3. Géologie régionale du secteur nord du lac Simard sur fond d'image satellitaire montrant la localisation des divers échantillons utilisés dans cette étude. Modifiée du SIGEOM (2010a). BLS : Batholite du lac Simard ; BRD : Batholite du Réservoir Decelles ; GP : Groupe de Pontiac. UTM NAD 83 – zone 17.

dykes de pegmatites¹ de taille variable (entre <1 et 30 m d'épaisseur) associés à des indices de métaux rares, dont plusieurs MCS (Li, Ta, Nb, ÉTR) (Perron et Labranche, 2017).

À l'intérieur du BRD, on retrouve des amas granitiques à texture pegmatitique qui sont en contact graduel avec les phases plus fines de celui-ci. Également on retrouve des dykes de pegmatite qui recoupent le BRD avec des contacts francs. La plupart de ces dykes ne montrent pas de zonation latérale et sont stériles sauf à quelques endroits où du béryl est noté. Chimiquement, ces deux faciès pegmatitique sont indistinguables des faciès plus fins du BRD. À l'extérieur du BRD, on retrouve généralement des dykes plus complexes qui présentent une zonation du mur au cœur avec un assemblage microcline-quartz-micas (surtout muscovite) dans la zone externe, microcline-quartz dans la zone intermédiaire, et une zone interne à quartz-albite ± minéraux d'intérêt. Ces pegmatites d'orientation généralement est-ouest sont minéralisées en spodumène (Li), colombo-tantalite (Nb-Ta) et parfois béryl (Be) pour les pegmatites LCT, et uranium-zirconium-niobium-éléments de terres rares (ÉTR) pour les pegmatites NYF.

Le secteur est exploré depuis les années 1950, date de la découverte des premiers indices de béryl et de spodumène dans le secteur de l'indice Claims Legault. Certains indices de lithium et de béryl ont également déjà été examinés par le MERN (Boily et al., 1989). L'ensemble des travaux d'exploration est compilé dans Richard (2021).

1.3 Problématique (*tirée de Legault et al., 2022*)

Les dykes de pegmatite minéralisée au nord du lac Simard montrent deux associations métallifères reconnues également ailleurs dans le monde (Černý et Ercit, 2005):

- a) Li-Cs-Ta (LCT);
- b) Nb-Y-F ± ÉTR, U, Th, Zr, Ta, Pb (NYF).

Les pegmatites LCT sont surtout caractérisées au Québec par la présence de spodumène (pyroxène) et beaucoup moins par la lépidolite (mica) et la pétalite (feldspath) (Boily et Gosselin, 2004). Ces pegmatites contiennent également des minéraux accessoires tels que la colombo-tantalite et le béryl. Les pegmatites NYF contiennent généralement des minéraux tels que le pyrochlore,

¹ Dans ce rapport le terme « dyke de pegmatite » indique une roche intrusive de composition granitique contenant une texture pegmatitique mais pouvant également contenir une granulométrie plus fine.

l'allanite, la monazite, l'euxinite, la gadolinite, l'uraninite et la thorite (Ercit, 2005). Cependant, la distribution de ces minéraux est généralement très erratique à l'intérieur des dykes (également le cas dans le secteur du lac Simard) et ils ne forment que très rarement des gisements exploitables en MCS (Linnen et al., 2012). Il est rare d'observer ces deux familles de pegmatite dans un même secteur (Ercit, 2005).

Selon Černý et Ercit (2005), les pegmatites de type LCT se formeraient dans un contexte compressif issu de plutons parents péralumineux. Le mode de formation des pegmatites est encore débattu à ce jour. Cependant, le modèle le plus communément accepté implique un liquide silicaté résiduel issu de la cristallisation fractionnée extrême d'un pluton granitique (London, 2018; Gourcerol et al., 2019). Les liquides résiduels sont alors enrichis en volatiles et en éléments rares, ainsi qu'en éléments fluxant (e.g., Li, F, B). La présence de ces éléments fluxant permet de baisser la température de cristallisation et le taux de nucléation du magma, diminuant également la polymérisation et la viscosité tout en augmentant la diffusion. Ces paramètres permettent alors de créer la texture caractéristique des pegmatites (Simmons et Webber, 2008). Ce modèle de formation est appuyé par la zonation spatiale des pegmatites autour d'un pluton parent.

En effet, dans la plupart des cas, on observe une variation chimique des pegmatites de type LCT en fonction de l'éloignement au pluton parent, avec des pegmatites stériles au contact et à l'intérieur du pluton, et des pegmatites riches en Li, F, P et autres éléments rares à caractère incompatible dans les zones les plus distales (Černý, 1991; Breaks et al., 2005). Cette zonation chimique s'accompagne d'une zonation minéralogique, avec des pegmatites à deux micas proches du pluton, et des pegmatites à spodumène, lépidolite, béryl et colombo-tantalite pour les plus éloignées du pluton (Müller et al., 2017) (*Figure 4*). Les pegmatites de type NYF ne montrent généralement pas une telle zonation à l'échelle régionale (Černý, 1991).

Des rapports tels que K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf sont les plus efficaces pour refléter le degré de fractionnement de la pegmatite (Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019). Des valeurs limites de ces ratios sont présentées au *tableau 2* pour distinguer les plutons parents fertiles et les dykes de pegmatite fertile pour les minéralisations en lithium.

1.4 Matériel et méthode :

Les échantillons étudiés proviennent des campagnes de 2021 et 2022 de faciès granitique du BRD

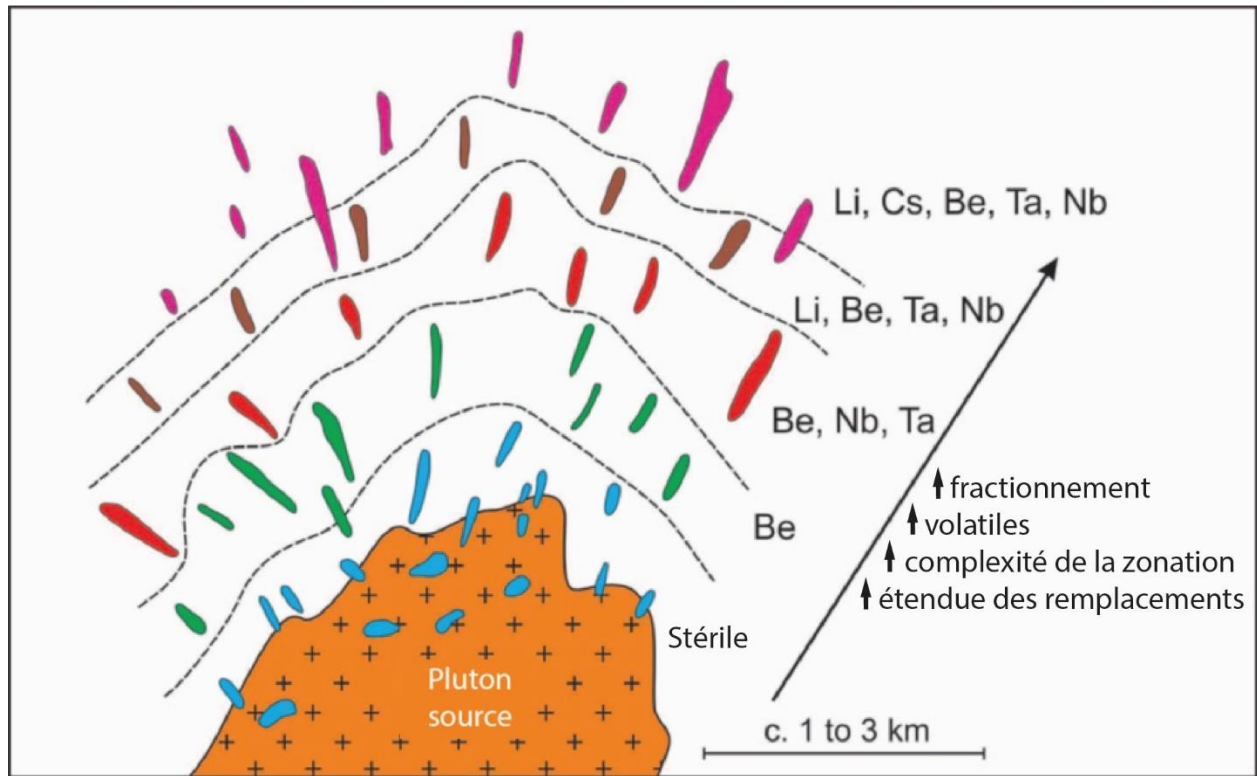


Figure 4. Schéma idéalisé d'un champ de pegmatites LCT illustrant la zonation autour du pluton parent. Les pegmatites stériles sont près ou à l'intérieur du pluton, tandis que les pegmatites enrichies en Li, Cs, Be, Ta, Nb sont plus éloignées. Modifiée de Müller et al. (2017).

Tableau 2. Valeurs limites des plutons sources (granite) et des dykes de pegmatite pour des minéralisations LCT. Tiré de la compilation de Cerny (1991), Breaks et al. (2005), Selway et al. (2005), Ballouard et al. (2016) et Legault (2023).

Ratio	Granite fertile	Pegmatite fertile
K/Rb	< 240	< 20
K/Cs	< 5 000	< 400
Mg/Li	< 50	< 1,0
Nb/Ta	< 5	< 1,65
Zr/Hf	< 25	< 8

(grain fin à grossier) ainsi que de ses phases pegmatitiques et des dykes granitiques à texture variant de pegmatitique à grain fin montrant une minéralisation en lithium (LCT) ou en niobium-uranium (NYF). Étant donné la variabilité de la granulométrie de ces derniers et malgré les précautions prises lors de l'échantillonnage, les échantillons ne sont pas nécessairement représentatifs des dykes échantillonnés.

Analyse chromatique

L'analyse chromatique a été réalisée sur des sections d'au moins 10 cm x 10 cm ayant subi une coloration au cobaltinitrite de sodium afin de colorer en jaune les feldspaths potassiques. Ensuite, les sections ont été numérisées et analysées avec le logiciel Image J disponible en accès libre selon la méthode décrite dans Goutier et al. (2001). Cette technique permet d'obtenir des pourcentages précis de l'ordre de 1 à 3 % pour chacun des minéraux (quartz, plagioclase, feldspath potassique et autres).

Analyse MEB (Microscope Électronique à Balayage) et EDS (Spectrométrie de Dispersion d'Énergie)

Parmi les échantillons observés, neufs des lames minces ont été envoyées au Laboratoire de Microanalyses à l'Université de Laval, qui a réalisé les analyses MEB et EDS, auxquelles nous avons contribué à distance. Le matériel utilisé est l'Inspect F-50 de FEI avec un spectromètre Octane Super-A d'Edax Ametek. La limite de détection de l'EDS est de l'ordre de 1000 à 5000 ppm et la précision est de l'ordre de 3 % à l'échelle du grain. Ces neuf lames ont été sélectionnées, car elles présentaient toutes un intérêt spécifique à la caractérisation minéralogique et chimique des pegmatites NYF et LCT.

Analyse géochimique

Les analyses ont été réalisées au laboratoire Actlabs et comprennent les groupes d'analyse 4LithoRech, 4B1 et 4B-INAA. Les conditions d'analyses et les limites de détections sont disponibles sur leur site web (<https://www.actlabs.com>). La précision analytique fut déterminée pour chaque élément en calculant la différence relative en pourcent entre les valeurs moyennes de matériaux de référence et leurs valeurs de référence certifiées. Les oxydes majeurs montrent des

différences relatives calculées < 5%, tandis que les éléments traces sont < 10%.

1.5 Résultats

Étude pétrographique

Batholite du Réservoir Decelles (BRD)

L'observation des différentes lames minces du BRD montre une composition granitique avec des proportions similaires de quartz, feldspath potassique (microcline et orthose) et plagioclase (albite-oligoclase) avec généralement moins de 15% biotite+muscovite+grenat. Le degré d'altération est généralement assez élevé dans les plagioclases et les biotites. Ces dernières montrent souvent une forte chloritisation, tandis que les plagioclases montrent une séricitisation variable. La microcline et la muscovite primaire sont généralement peu altérées.

La coloration au cobaltinitrite de sodium a permis d'évaluer les pourcentages de feldspath potassique et de plagioclase de plusieurs échantillons (*figure 5*). Pour les faciès de grain fin à grossier du BRD, on note des pourcentages plus ou moins équivalents de feldspath potassique et de plagioclase. D'autres sections du BRD devront être numérisées et analysées afin de déterminer s'il existe une variation spatiale dans le BRD.

Une attention fut également portée sur la variation de la biotite et de la muscovite dans les différentes phases magmatiques du secteur à l'étude. À l'intérieur du BRD, trois faciès peuvent être distingués des roches de grain fin à grossier selon le type et les pourcentages de micas primaires observés en lames minces : majoritairement biotite, mixte biotite-muscovite et majoritairement muscovite. La *figure 6* présente la distribution spatiale des échantillons à l'intérieur du BRD selon ces faciès. On note une concentration du faciès à biotite dans le coin sud-ouest tandis que le faciès à muscovite tend à se concentrer dans la partie sud-est.

Dykes de pegmatite

Les dykes de pegmatite montrent une minéralogie similaire au BRD avec en plus la présence fréquente de grenat manganifère orangé (spessartine) et localement de béryl pluricentimétrique. Le mica présent est généralement de la muscovite avec rarement la présence de biotite dans quelques rares dykes de pegmatite à l'intérieur du BRD et de type NYF. Dans les sections colorées, les pegmatites LCT et NYF montrent plus de plagioclase (albite) que de feldspath potassique, tandis

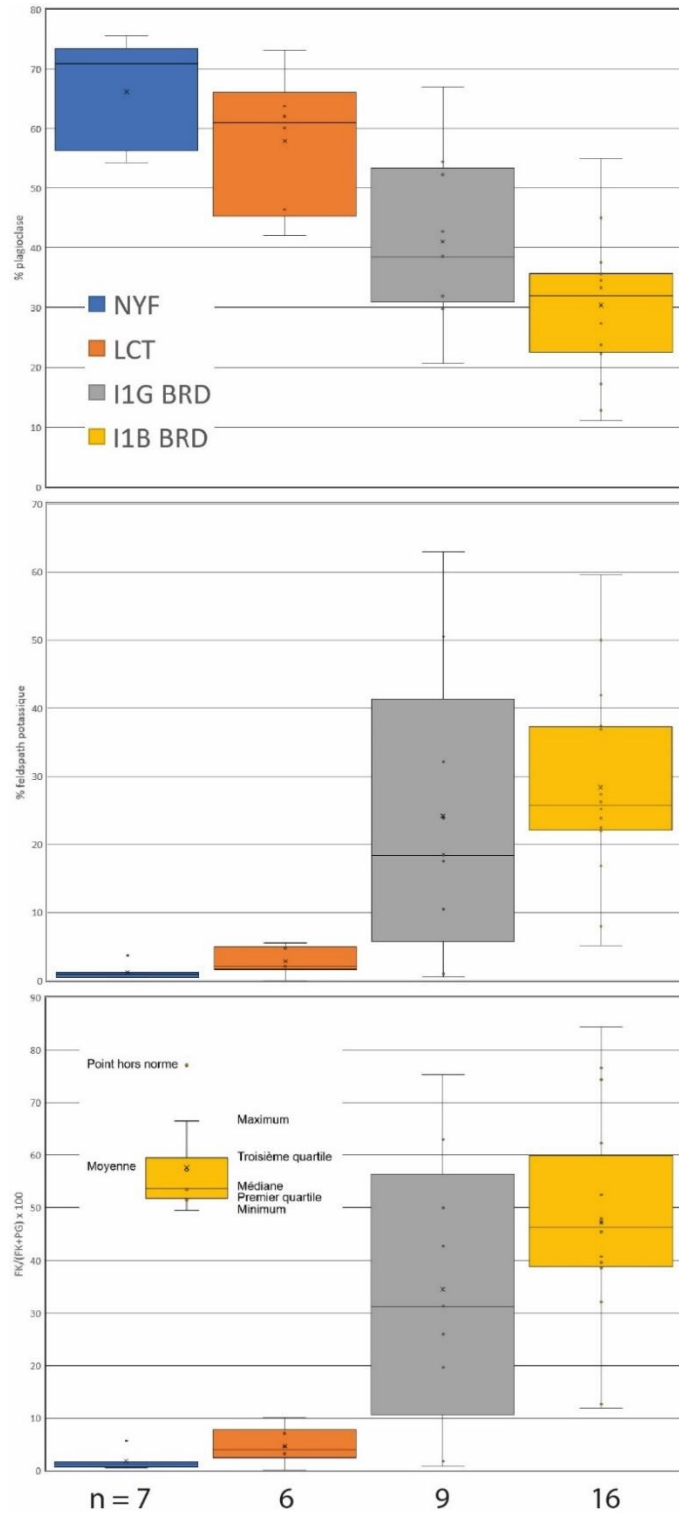


Figure 5. Boîtes à moustache montrant le pourcentage de feldspath potassique (FK), du plagioclase (PG) et du ratio $FK/(FK+PG) \times 100$ du Batholite du Réservoir Decelles et des pegmatites à l'intérieur de celui-ci ainsi que des pegmatites LCT et NYF.

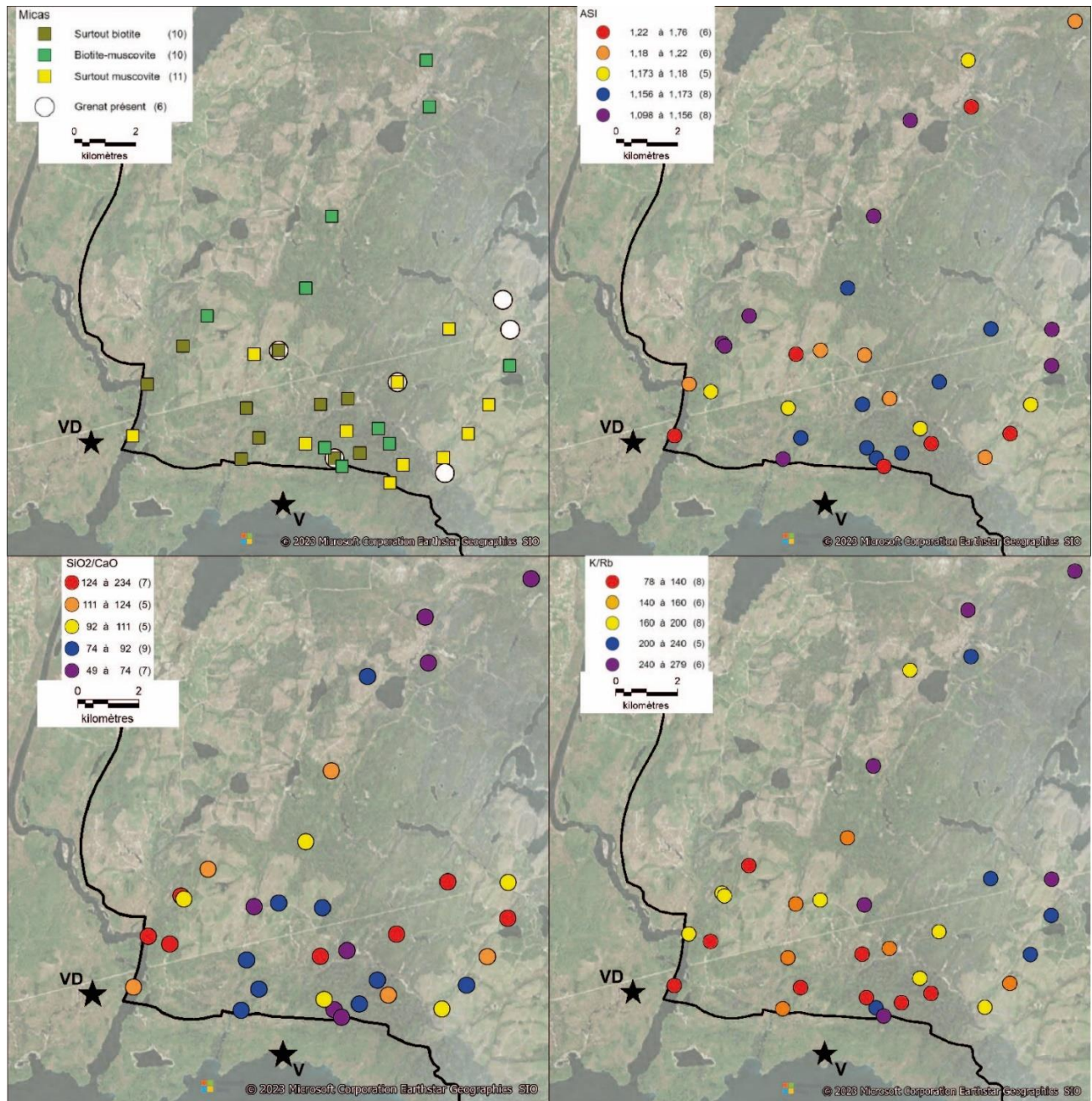


Figure 6. Distribution minéralogique (A) et des indices chimiques (B à D) à l'intérieur du BRD basée sur les analyses de 2021 et 2022. Distribution des micas est tel qu'observée en lames minces tandis que celle du grenat est tel qu'observée sur les affleurements. ASI = indice de saturation d'aluminium ($Al/(Ca-1,67P+Na+K)$) (Frost et al., 2001). VD – gisement lithifère de Viau-Dallaire; V – gîte lithinifère de Viau.

Tableau 3 : Occurrences minérales des pegmatites LCT et NYF du lac Simard, estimées à la suite des observations au microscope optique, MEB et aux analyses EDS. (A) : Abondant ; (F) : Fréquent ; (R) : Rare ; (E) : Exceptionnel ; (-) Non observé.

MINÉRAUX	PEGMATITES	
	LCT	NYF
SILICATES		
Quartz	A	A
Orthose	F	F
Albite	A	A
Spessartine	F	F
Almandin	-	E
Grossulaire	-	R
Spodumène	A	-
Muscovite	A	F
Biotite	-	F
Phlogopite	E	-
Allanite	-	R
Zircon	-	F
Titanite	-	E
AUTRES		
Colombotantalite	F	F
Bismuthotantalite	E	-
Colombite	-	E
Hématite	-	A
Magnétite	-	A
Illmenite	-	F
Cassitérite	-	R
Pyrophanite	-	F
Bétafite	-	R
Calciobétafite	-	E
Ghanite	E	-
Apatite	E	E
Monzanite	-	E

que les pegmatites à l'intérieur du BRD le feldspath potassique est généralement plus commun (*figure 5*). De plus, on note des enrichissements en spodumène (pegmatites LCT) et en magnétite/hématite, ilmenite/pyrophanite et zircon (pegmatites NYF) (*tableau 3*). La colombo-tantalite est fréquemment observée dans les deux types de pegmatite minéralisée.

Géochimie

Batholite du Réservoir Decelles (BRD)

Les échantillons des faciès fins à grossier du BRD montrent des compositions chimiques typiques des granites à biotite-muscovite et très similaires aux granites à deux micas des sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac (Feng et Kerrich, 1992; Boily, 1993; Mulja, 1995) et d'ailleurs au monde (Laurent et al., 2014). Ils ont des hautes concentrations en silice ($\text{SiO}_2 = 71,3 - 77,0$ % poids recalculé à 100% anhydre) et une tendance fortement peralumineuse (indice de saturation en aluminium (ASI) $> 1,1$) (*figure 7*). Cependant le BRD montre de très faibles concentrations en Cs < 7 ppm, Nb < 30 ppm et Ta < 16 ppm en comparaison à d'autres granites à deux micas archéens spatialement associés à des minéralisations en lithium (Černý, 1991; Breaks et al., 2005). Cependant, les valeurs de Ta se comparent à celles des granites de la Suite plutonique de Preissac-La Corne (Boily, 1993; Mulja, 1995). Ces faibles teneurs font que la plupart des valeurs des ratios associées au fractionnement (K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf) sont supérieures à celles fixées pour les granites fertiles (*figure 7 et tableau 2*). La distribution des éléments chimiques et de leurs ratios ne montre pas une zonation claire dans le BRD à l'échelle du secteur à l'étude ce qui est en accord avec la variation minéralogique (*figure 6*).

Dykes de pegmatite

Les pegmatites sont tous peralumineuses avec les pegmatites LCT montrant des valeurs ASI plus élevées surtout ceux riches en spodumène ($> 25\%$ SO) qui ont des ASI de plus de 2 (*figure 7*). Quant à eux, les pegmatites NYF sont faiblement peralumineuses et basées sur leur composition chimique, elles font partie du sous-groupe à euxinite de Ercit (2005). Les pegmatites LCT sont généralement caractérisées par des teneurs plus élevées en Li, Be, Cs, Rb et plus faibles en Ba, Sr et ÉTR (*figure 7*). Quant à eux, les pegmatites NYF sont enrichies en Nb, Hf, Pb, Sc, U, Th, Y, Zr

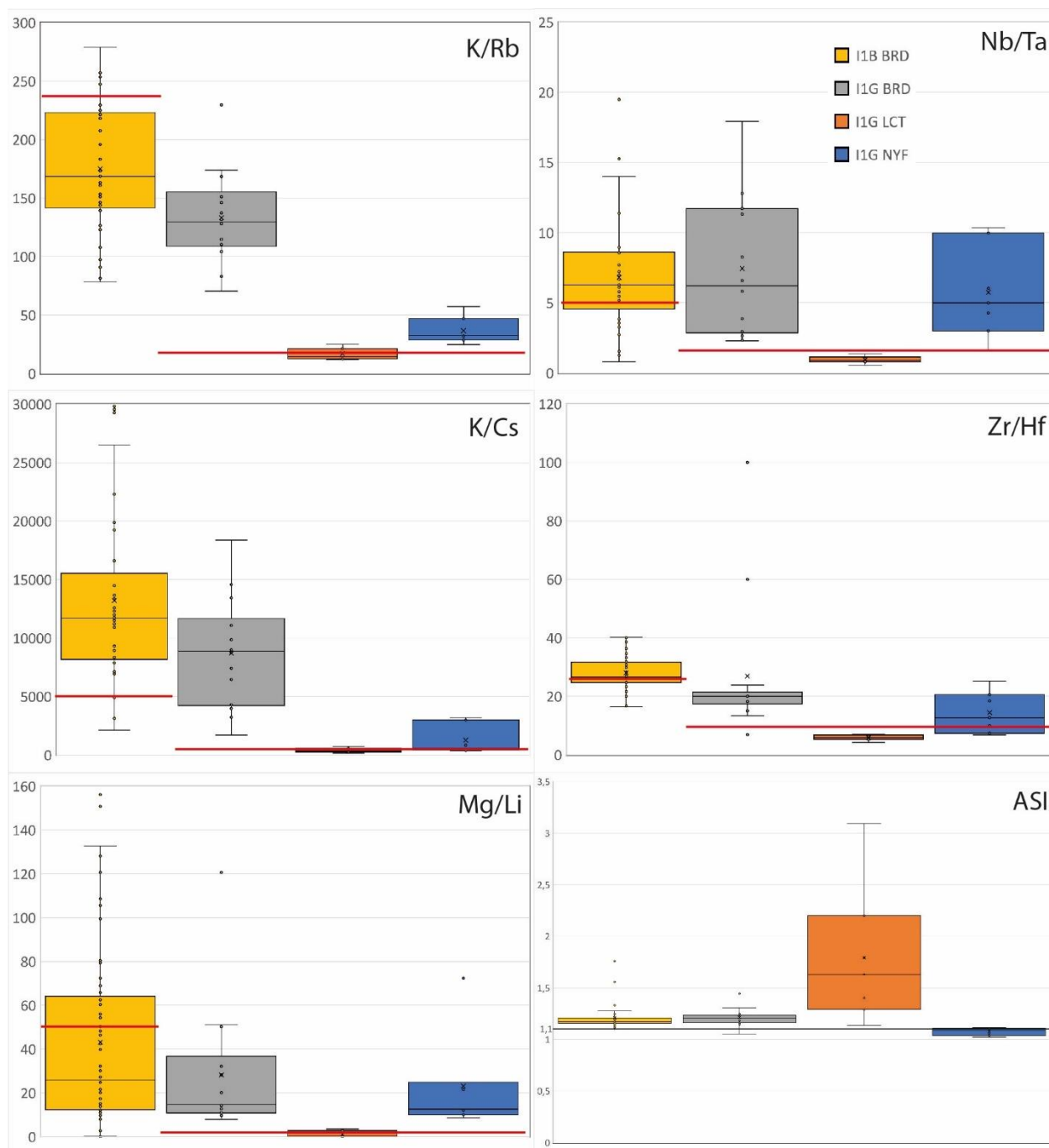


Figure 7. Variations des ratios K/Rb, K/Cs, Mg/Li, Nb/Ta, Zr/Hf et ASI pour les granites du BRD (I1B BRD), les pegmatites du BRD (I1G BRD), les pegmatites LCT (I1G LCT) et les pegmatites NYF (I1G NYF). Les lignes rouges indiquent les limites des granites et des pegmatites fertiles du tableau 2, tandis que la ligne noire distingue les roches peralumineuses des roches fortement peralumineuses (ASI = 1,1).

et ÉTR (surtout ÉTR lourds) (*figure 8*). Ces variabilités de concentration font que les pegmatites LCT montrent des ratios K/Rb, K/Cs, Mg/Li, Nb/Ta et Zr/Hf plus faibles en général que les autres dykes de pegmatite (*figure 7*) et représentent donc les magmas felsiques les plus fractionnés du secteur. On note également sur les différents diagrammes de la *figure 8* qu'une évolution magmatique est visible et généralement bien définie des granites du BRD vers les pegmatites du BRD vers les pegmatites LCT. Cependant, la localisation des pegmatites NYF le long de cette évolution magmatique est moins claire. Par endroits, ces pegmatites se situent sur la tendance comme dans le cas des graphiques $(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}+\text{MgO})/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ versus SiO_2/CaO et CaO/MnO versus K/Rb où les pegmatites NYF se retrouvent le long de la tendance de fractionnement magmatique entre les pegmatites du BRD et les pegmatites LCT (*figure 8*). Dans d'autres cas cependant, les pegmatites NYF se situent sur une tendance différente des pegmatites LCT comme dans le graphique Y/Ho versus Zr/Hf ou montrent une tendance similaire au BRD comme le graphique U/Nb versus Ta/Nb (*figure 8*). Ceci est également le cas des ÉTR où les pegmatites NYF montrent des ÉTR légers de concentrations similaires aux granites du BRD et des ÉTR lourds également similaires à légèrement enrichies au BRD (*figure 8*). Cependant, les pegmatites LCT ont des concentrations d'ÉTR systématiquement inférieures à celles des granites du BRD.

Composition minéralogique

Dans l'objectif de mieux comprendre l'évolution magmatique des pegmatites LCT et NYF, des analyses au MEB-EDS ont été effectuées sur deux minéraux qui sont présents dans les deux types de pegmatite, soit les grenats (spessartines) et les colombo-tantalites. De plus, l'analyse des spodumènes a été effectuée afin de mieux comprendre les altérations qui les affectent.

Spessartines

La spessartine est un minéral au système cristallin cubique de la famille des grenats, appartenant au groupe des silicates. Sa formule chimique est $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$. Les spessartines dans les 2 groupes de pegmatites sont les grenats les plus abondants et les observations ont permis de mettre plusieurs choses en évidence.

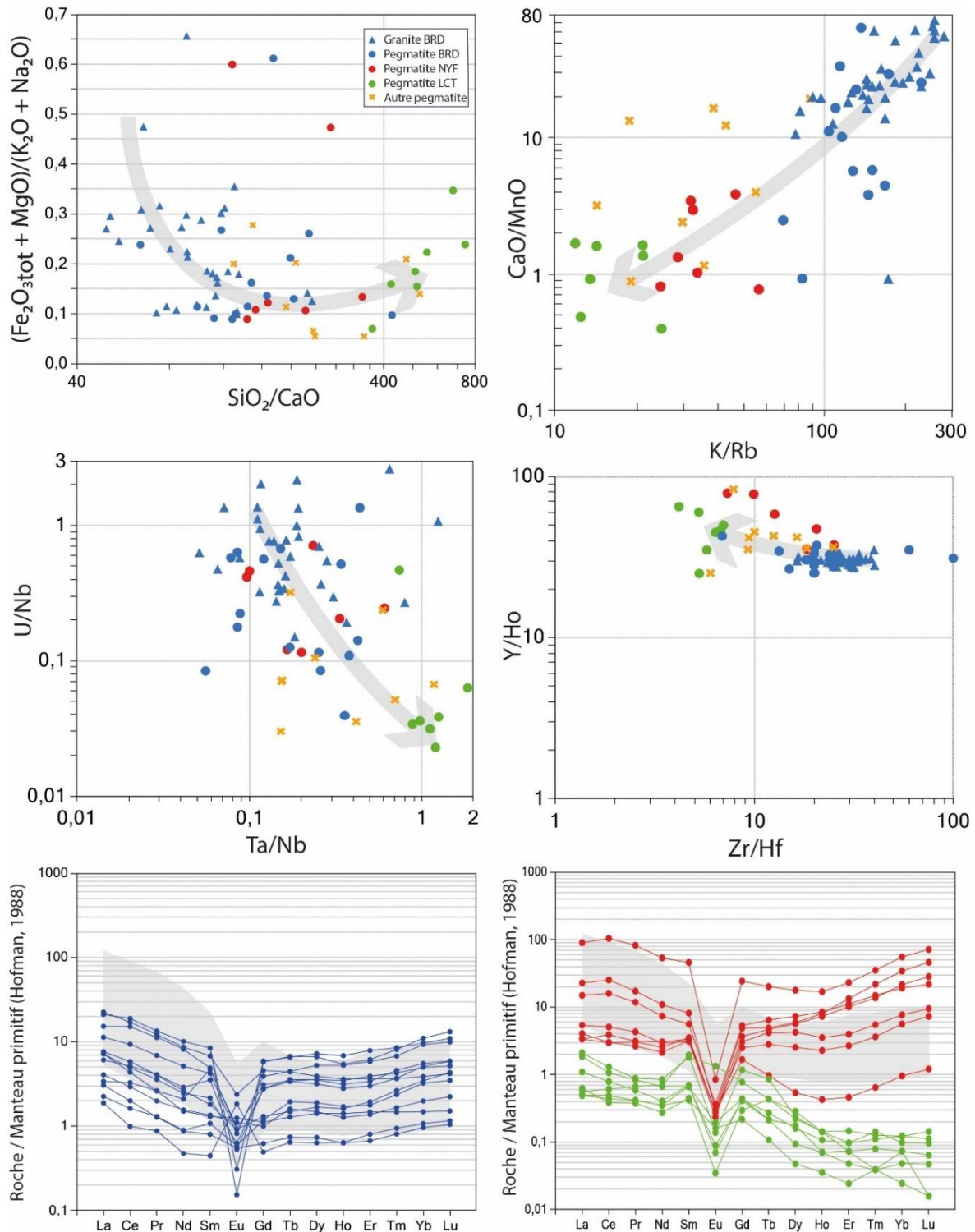


Figure 8. Variation des compositions chimiques des granites du BRD, des pegmatites du BRD, des pegmatites LCT, des pegmatites NYF et autres dykes de pegmatite à l'extérieur du BRD. Les flèches grises indiquent la tendance des granites BRD vers pegmatites BRD vers pegmatites LCT. La zone en gris dans les spectres d'ÉTR représente les valeurs associées aux granites à grain fin à grossier du BRD.

Dans le type LCT, les spessartines semblent subautomorphes et ne contiennent pas d'inclusion (*figure 9a*). Elles se trouvent également associées à des zones d'altération de spodumène (*figure 9b*).

Dans le type NYF, les spessartines sont très fréquemment automorphes (*figure 9d*), mais parfois plus subxénomorphes (*figure 9c,d*) et associées à des oxydes qui, dans la plupart des cas, sont en inclusion au centre du grenat (*figure 9c,d*). Dans la majeure partie des cas, il s'agit d'hématite et de magnétite, plus rarement d'ilménite, de pyrophanite ou de colombo-tantalite. On y trouve également des inclusions de zircon et très exceptionnellement de bétafite. Les spessartines des pegmatites NYF montrent également parfois une zonation; les analyses au EDS ont révélé une bordure enrichie en calcium et appauvrie en magnésium contre un cœur ne contenant pas de calcium. Sur la *figure 9d*, l'hématite est entourée de plusieurs cristaux de spessartine, ils semblent grandir autour de lui. L'hématite semble être une zone de nucléation préférentielle des spessartines dans le type NYF. En résumé les spessartines dans les types LCT et NYF montrent des caractéristiques très différentes.

Chimie

Les analyses chimiques des grenats reposent sur 15 analyses EDS pour les NYF et 10 pour les LCT. La *figure 10a* inspirée de Breaks et al. (2003) représente en ordonné, Mg apfu (en proportion atomique par formule unitaire) par rapport à $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ pour les compositions de grenat. Avec l'augmentation du fractionnement magmatique, la composition du grenat évolue d'almandin à spessartine par une diminution du magnésium et du fer dans le magma.

Cette *figure 10a* montre que les grenats contenant du magnésium sont uniquement ceux du type NYF; les grenats du type LCT se trouvent le long de l'axe des abscisses. Les grenats des 2 groupes seraient donc majoritairement des spessartines et auraient des compositions chimiques correspondant à un haut niveau de fractionnement. La *figure 10b* est un diagramme ternaire permettant de classer les grenats dans les catégories spessartine, almandin et grossulaire. Les grenats du type NYF montrent des compositions éparses, avec quelques grenats qualifiables d'almandin et de grossulaire et une majorité qui sont des spessartines. Les grenats du type LCT contiennent au minimum 70% de manganèse et sont par conséquent tous des spessartines.

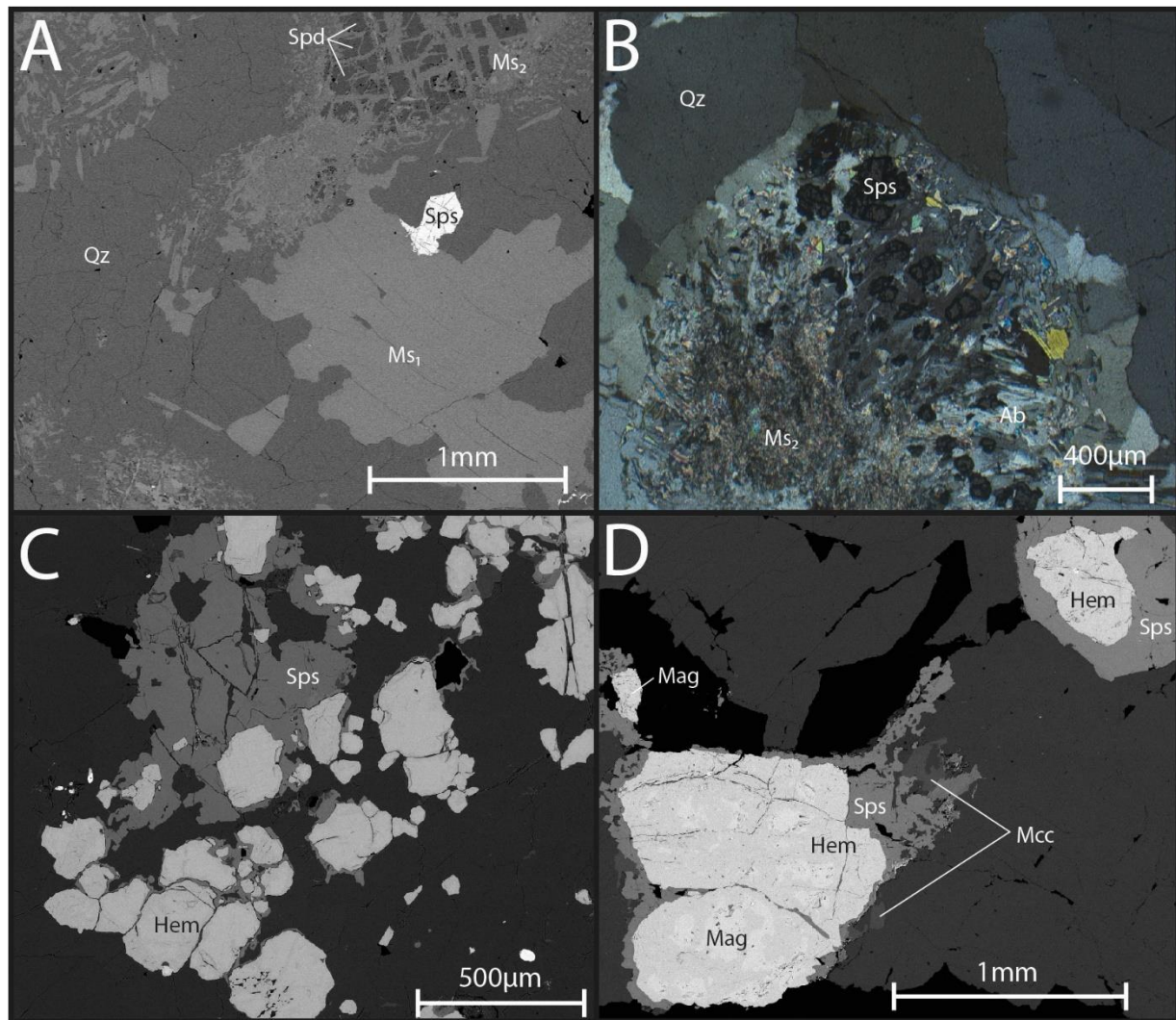


Figure 9. Photographies de MEB et de MO de spessartines dans les pegmatites de type LCT et NYF. A. Photographie au MEB d'une spessartine subautomorphe aux abords d'une muscovite magmatique. 22-CD-2010A. LCT. B. Photographie au MO d'un spodumène complètement altéré et remplacé par des spessartines subxénomorphes, muscovite, albite et quartz. 22-CD-2010A. Lumière polarisée et analysée. LCT. C. Photographie au MEB d'une spessartine xénomorphe cristallisant sur des grains d'hématite jusqu'à les envelopper complètement. 21-FP-2006A. NYF. D. Photographie MEB de spessartines automorphes et xénomorphes contenant des inclusions de magnétite montrant différents degrés d'altération en hématite. 21-FP-2016D. NYF. AB : Albite; GS : Spessartine; MG : Magnétite; ML : Microcline; MV1 : Muscovite magmatique; MV2 : Muscovite hydrothermale; QZ : Quartz; SO : Spodumène; TO : Colombo-tantalite; ZC : Zircon.

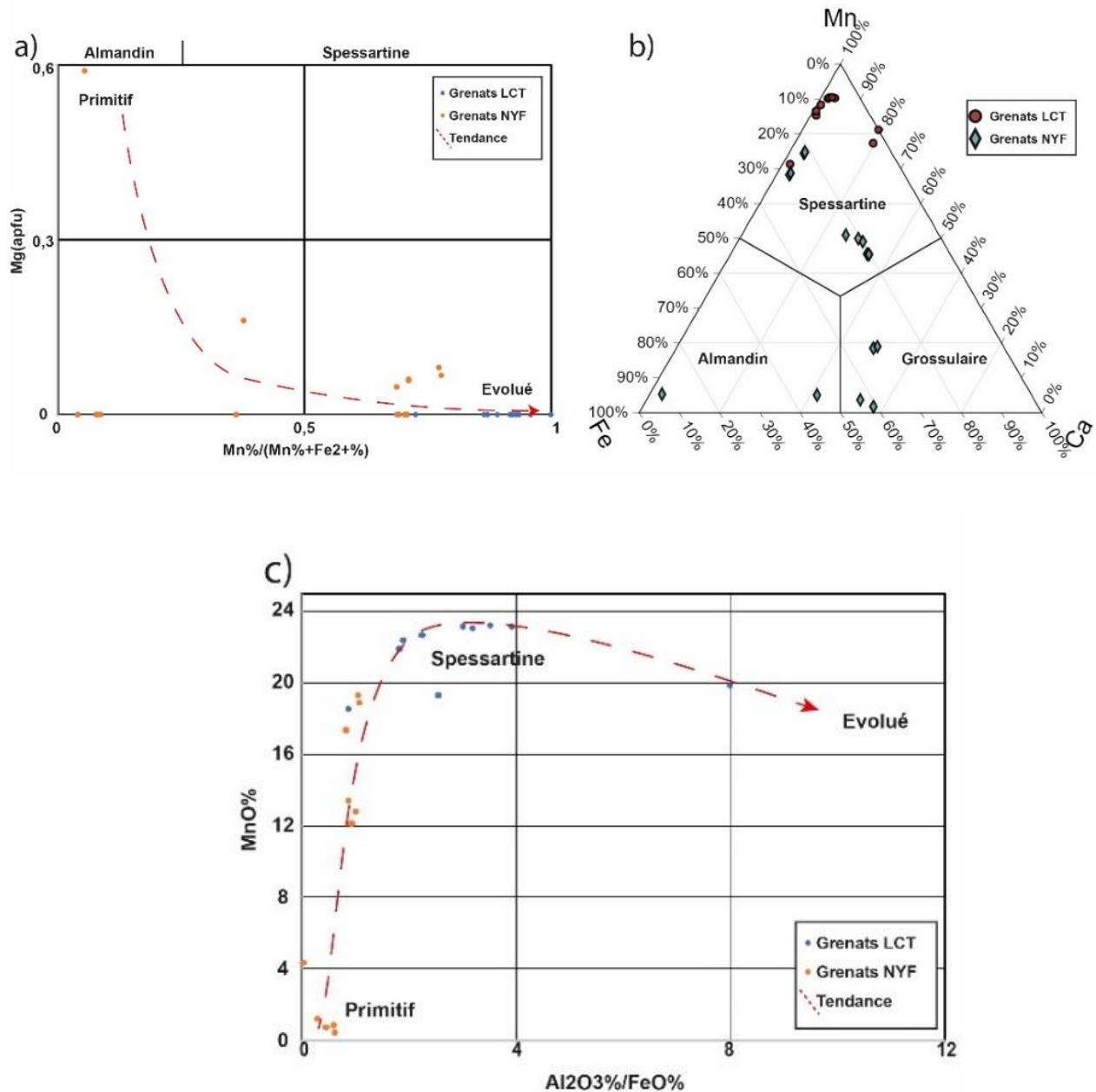


Figure 10. Graphiques réalisés à partir des données EDS de grenats des pegmatites de types LCT et NYF. (a) Mg (apfu) en fonction de Mn/(Mn+Fe₂₊) pour les compositions de grenat. Avec l'augmentation du fractionnement du liquide magmatique formant les pegmatites, la composition du grenat évolue d'almandin à spessartine. Flèche de fractionnement magmatique de Breaks et al. (2003). (b) Diagramme ternaire des teneurs normalisé à 100% de Fe, Mn et Ca permettant de classer les grenats analysés dans les catégories almandin, spessartine ou grossulaire ; (c) Graphique MnO vs Al₂O₃/FeO permettant de différencier les grenats riches en Mn qui sont des spessartines. Les flèches rouges indiquent le sens d'évolution du fractionnement magmatique. « Primitif » et « évolué » sont des termes qualitatifs pour décrire le fractionnement relatif entre chaque grenat.

La *figure 10c* met en lumière une hausse significative des concentrations de manganèse et du rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ au cours de la transition des pegmatites NYF aux LCT.

Ces graphiques illustrent clairement une transition chimique des grenats, caractérisée par une diminution des niveaux de magnésium et de fer, en parallèle à une augmentation des concentrations de manganèse et d'aluminium. Cette évolution chimique conduit à la formation de spessartine dans les roches les plus évoluées qui sont ici celles de type LCT.

Colombo-tantalite

La colombo-tantalite est un oxyde qui cristallise dans le système cristallin orthorhombique. Elle est composée principalement de niobium et de tantale; sa formule chimique est $(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$. La colombo-tantalite se distingue en tant qu'unique oxyde partagé entre le type LCT et NYF. Une distinction majeure entre ces deux types réside tout d'abord dans la taille des grains : dans les NYF, les grains, parfois visible à l'œil nu, peuvent dépasser le millimètre, tandis que dans les LCT, les grains sont considérablement plus petits. De plus, les grains dans les LCT se trouvent souvent sans inclusions et non-associés avec d'autres minéraux (*figure 11a,b*), contrairement à ceux des NYF qui peuvent être inclus dans la spessartine (*figure 11c*). Parfois on note la présence de bétafite comme minéral porteur du niobium dans les pegmatites NYF (*figure 11d*). Les grains dans les LCT sont généralement subautomorphes à automorphes et peuvent présenter des zonations visibles sous l'analyse EDS (*figure 11a,b*), reflétant des variations en niobium et tantale, avec une tendance à s'enrichir en tantale par rapport au niobium vers le bord des grains.

Chimie

Les analyses comprennent 15 mesures EDS de colombo-tantalites pour les LCT, ainsi que 3 analyses de colombo-tantalite et 6 de bétafite pour les NYF. La bétafite, appartenant au groupe des uranothorites, est un oxyde complexe avec une formule chimique générale $(\text{Ca,ÉTR,U,Th})(\text{Ti,Nb,Ta})_2\text{O}_6$. Sa composition, incluant du niobium et du tantale, la rend particulièrement intéressante à comparer avec la colombo-tantalite.

La *figure 12a* vise à affiner la classification des minéraux identifiés comme colombo-tantalite.

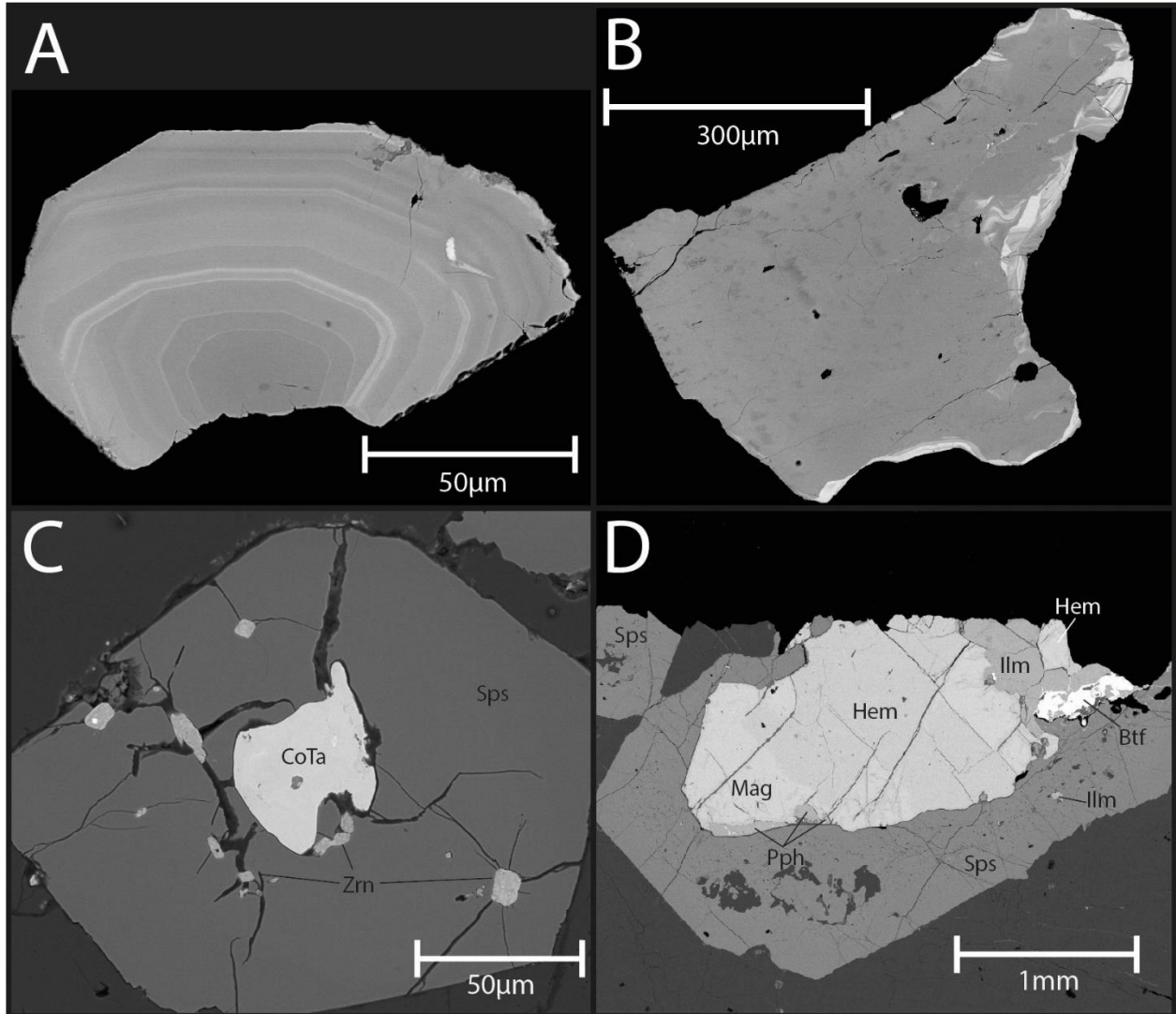


Figure 11. Photographies de MEB de colombo-tantalite et de bêtafite dans les pegmatites des types LCT et NYF. A. Photographie d'un grain de colombo-tantalite automorphe présentant de nombreuses zonations (bandes plus claires sont plus riches en Ta). 21-FP-2002A1. LCT. B. Photographie d'un grain xénomorphe de colombo-tantalite avec une bordure partielle plus riche en Ta. 21-FP-2002A2. LCT. C. Photographie à contraste bas d'une inclusion xénomorphe de colombo-tantalite et de plusieurs inclusions de zircon dans une spessartine. 21-FP-2006A. NYF. D. Photographie d'un grain de bêtafite au contact entre un grain d'ilménite et de spessartine. On remarque que la bêtafite remplit des fractures de ces deux minéraux. On voit également de la pyrophanite en bordure d'un grain de magnétite montrant une forte hématisation. 21-FP-2013C. NYF. Btf : Bêtafite ; CoTa : Colombo-tantalite; Hem : Hématite; Ilm : Ilménite; Mag : Magnétite; Pph : Pyrophanite; Qz : Quartz ; Sps : Spessartine ; Zrn : Zircon.

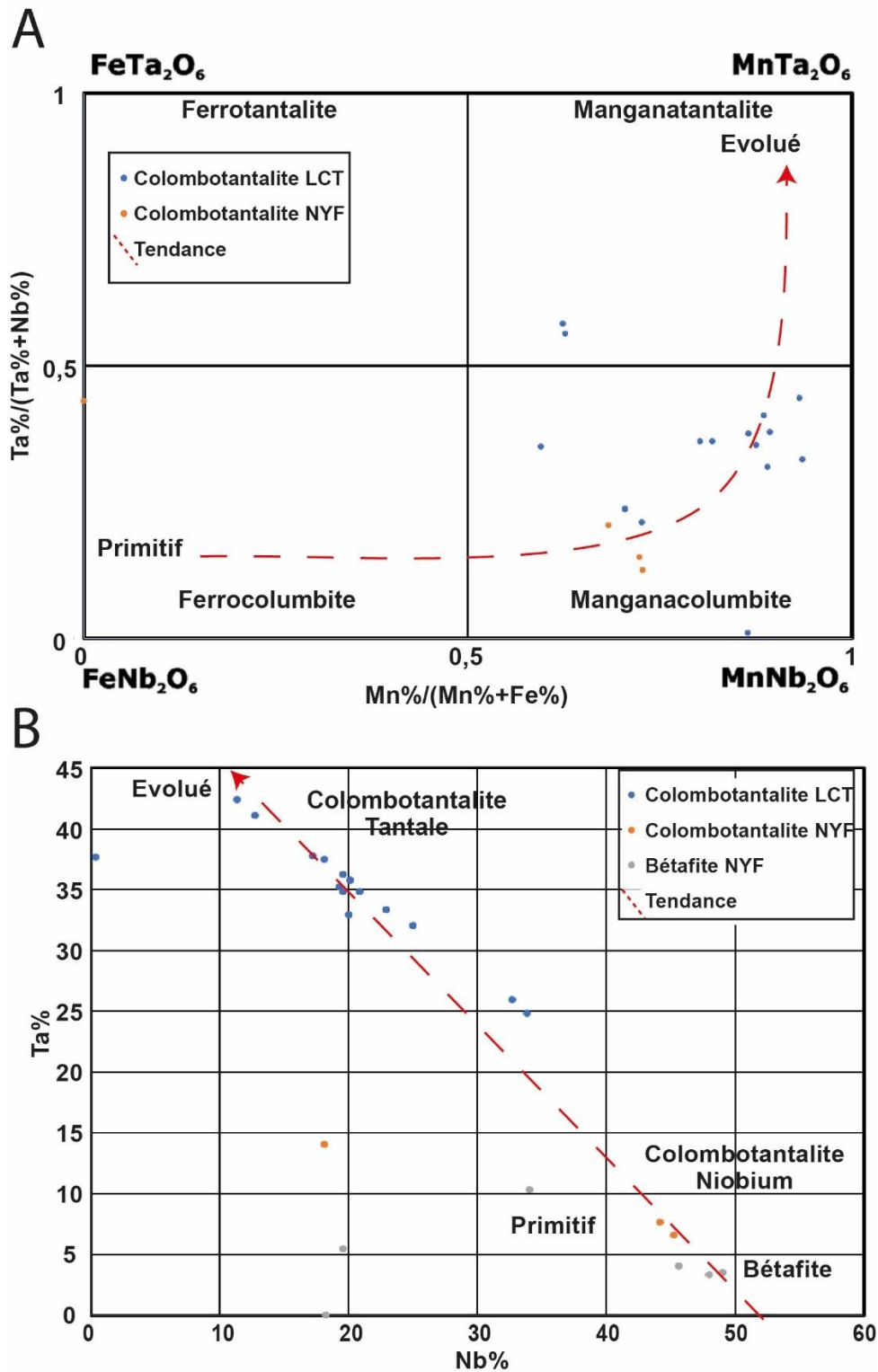


Figure 12. Graphiques à partir de données EDS de colombo-tantalite et de bétafite des pegmatites des types LCT et NYF. A. Ta/(Ta+Nb) vs Mn/(Mn+Fe) pour les analyses de colombo-tantalites. Flèche de fractionnement magmatique de Breaks et al. (2003). B. Ta (%) vs Nb (%) pour les analyses de colombo-tantalite LCT et NYF et de bétafite pour comparer les niveaux de fractionnement de chaque espèce minérale.

Les analyses montrent principalement que ces échantillons sont plus précisément de la manganacolumbite, proche du pôle du niobium, et que quelques-uns sont des manganatantalites. Les processus de fractionnement magmatique favorisant l'enrichissement en tantale et en manganèse par rapport au fer et au niobium, la manganatantalite constituerait donc le stade le plus évolué (Breaks et al., 2003).

La *figure 12b* illustre les proportions de tantale par rapport au niobium dans la colombo-tantalite et la bétafite. La bétafite présente une nette prédominance du niobium sur le tantale comparé aux colombo-tantalites. Cela suggère une possible formation antérieure des bétafites. Cependant les observations au MEB semblent indiquer une nature plutôt tardive de la bétafite (*figure 11d*). On observe ensuite une augmentation significative du tantale par rapport au niobium dans les colombo-tantalites des LCT en comparaison avec ceux des NYF. Cela suggère que les manganatantalites des LCT représenteraient les formes les plus évoluées (Breaks et al., 2003).

Spodumène

Le spodumène est un minéral silicaté faisant partie du groupe des pyroxènes. Sa composition chimique est généralement exprimée par la formule $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$. Il cristallise dans le système monoclinique et se présente généralement sous forme de cristaux prismatiques allongés. Sur le plan minéralogique, les cristaux de spodumène sont automorphes et leurs tailles varient de millimétrique à pluricentimétrique.

Une caractéristique particulièrement notable des spodumènes dans ces échantillons réside dans sa propension à subir une altération systématique en muscovite le long de ses plans de clivage (*figure 9a*). Dans les spodumènes les moins altérés on note parfois une altération coronitique où il se transforme en gouttelettes de quartz, microcline et muscovite (*figure 13a,b*). De manière plus exceptionnelle, le spodumène est presque totalement remplacé par un amalgame de muscovite (enrichie en fer, magnésium et manganèse comparé à la muscovite des altérations moins poussées), microcline et quartz (*figure 13c,d*).

Chimie

D'un point de vue chimique, les analyses EDS révèlent des variations minimales dans les éléments majeurs du spodumène. De légères fluctuations en fer, calcium et manganèse sont occasionnellement observées à l'échelle locale, mais restent négligeables en proportion.

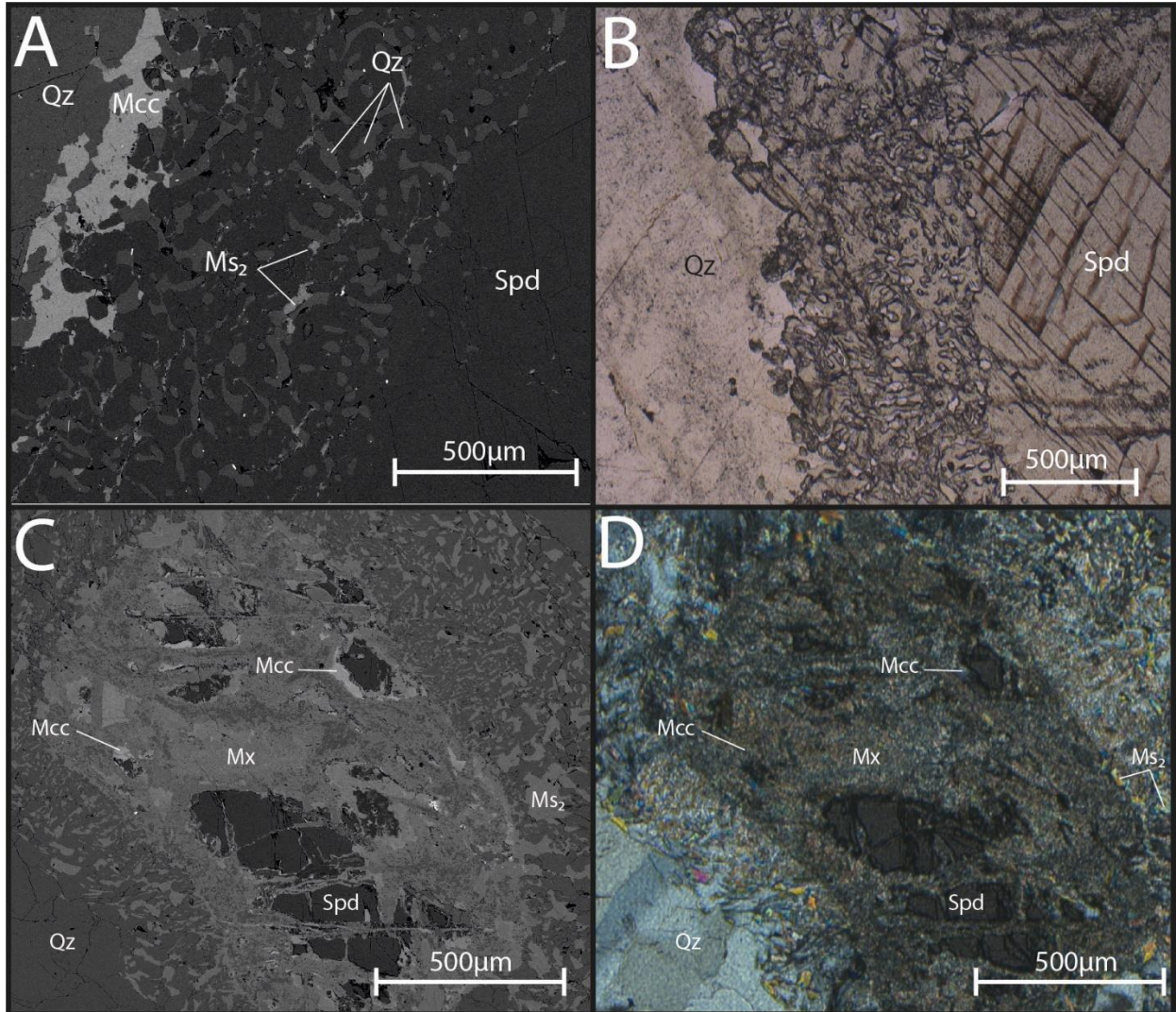


Figure 13. Photographies de MEB et de MO de spodumènes dans les pegmatites de type LCT. A. Photographie au MEB permettant de voir la surface d'altération coronitique du spodumène, qui se transforme/altère en quartz, microcline et muscovite. 21-FP-2002A2. B. Photographie au MO du même grain. Lumière polarisée. 21-FP-2002A2. C. Photographie MEB montrant un spodumène fortement altéré dont seulement les cœurs sont préservés. On note une bordure extérieure de quartz et muscovite, et une bordure intérieure d'un mélange de muscovite, microcline et quartz (Mx) à grains plus fins. 22-CD-2010A. D. Photographie au MO du même grain. Lumière polarisée et analysée. 22-CD-2010A. Mcc : Microcline; Ms2 : Muscovite hydrothermale; Mx : mélange muscovite+microcline+quartz; Qz : Quartz; Spd : Spodumène.

Les analyses EDS, en raison de la faible énergie des rayons X distinctifs du lithium, n'ont parfois pas pu identifier certains minéraux potentiellement lithinifères présents dans les zones altérées du spodumène. La fine granulométrie de ces minéraux d'altération rend difficile leur identification au microscope optique.

1.6 Conclusion

Cette étude a présenté que les pegmatites LCT et NYF semblent montrer une association magmatique avec le Batholite du Réservoir Decelles. Certains ratios chimiques dans les analyses de roche totale ainsi que dans les grenats et la colombo-tantalite suggèrent que les pegmatites NYF et LCT ont été issues du fractionnement magmatique du BRD et que les pegmatites NYF sont moins fractionnées que les pegmatites LCT. D'autres ratios en revanche suggèrent que les pegmatites NYF et LCT ont possiblement évolué de façon différente (contamination du magma des pegmatites NYF?). Les spodumènes présentent des altérations en muscovite, microcline et quartz et donc une attention particulière doit donc être portée à ces altérations qui pourraient être gênantes pour les processus d'extraction du lithium.

1.7 Recommandations

Les recommandations pour la suite du projet sont :

- Porter un intérêt particulier aux altérations du spodumène pour quantifier leur impact sur les processus de traitement.
- Identifier les possibles minéraux lithinifères présents dans les zones d'altérations.

2. Étude des indices d'éléments de terres rares dans les carbonatites du secteur de Lebel-sur-Quévillon (S. Auclair)

2.1 Introduction

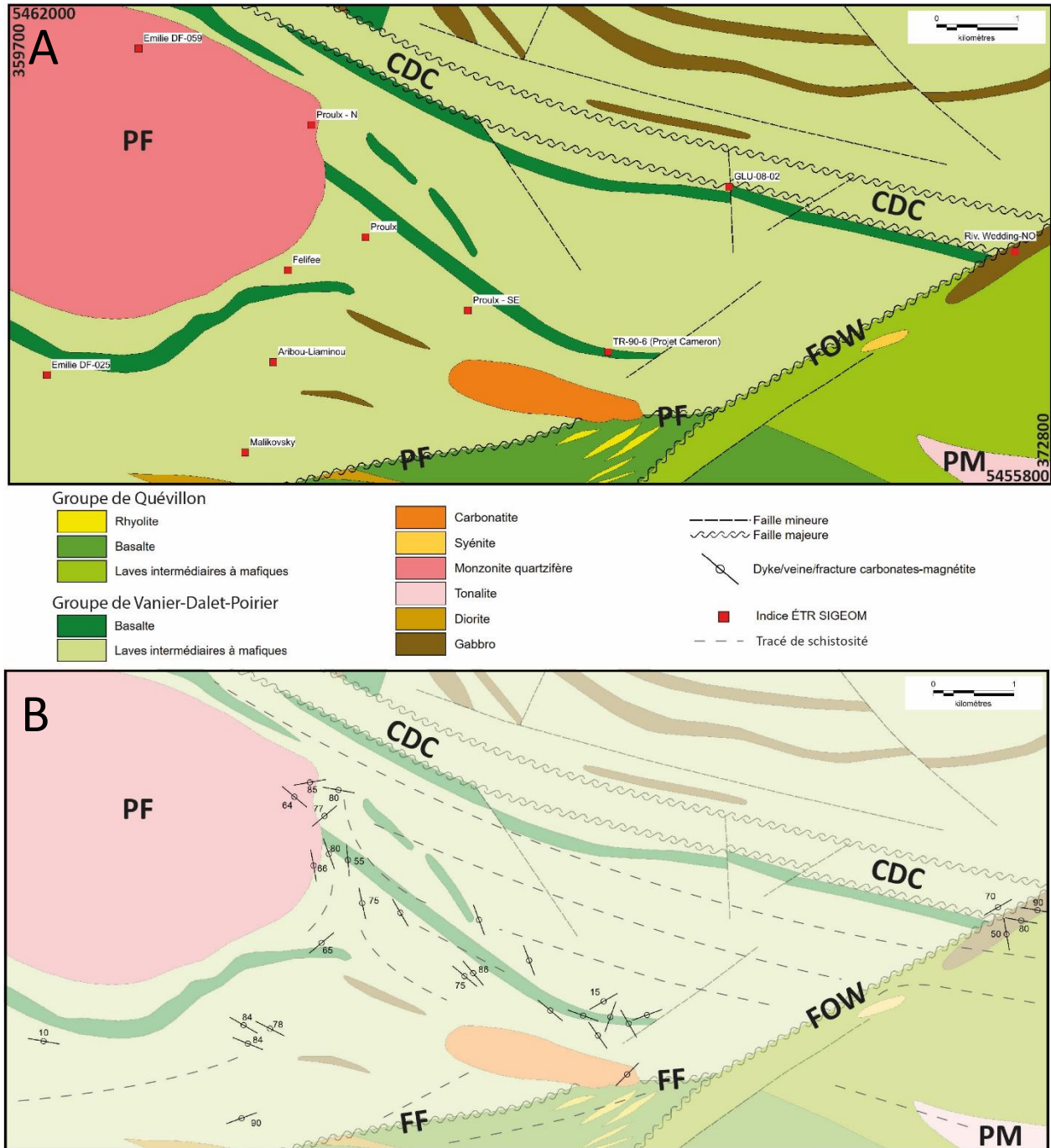
Ce rapport présente un résumé des travaux effectués dans le cadre d'un projet de fin d'études de Master 2 portant sur l'étude des indices en éléments de terres rares (ÉTR) dans la région de Lebel-sur-Quévillon. Étant donné les feux de forêt qui ont sévi dans ce secteur et l'interdiction de travaux en forêt associée, il n'y a pas eu de travaux de terrain effectués à l'été 2023. L'objectif du projet fut donc en grande partie restreint à l'observation des lames minces et l'interprétation des analyses chimiques des échantillons de Valdenaire (2019).

2.2 Contexte géologique

Le secteur à l'étude au nord de Lebel-sur-Quévillon se trouve dans le nord de la Sous-province de l'Abitibi, située dans l'est de la province géologique du Supérieur (*figure 1*). La région d'intérêt se localise plus précisément à l'intérieur du Groupe de Vanier-Dalet-Poirier, orientée est-ouest, avec un pendage généralement presque vertical (SIGEOM, 2010b) (*figure 14A*). Cette unité est composée surtout de roches volcaniques mafiques à intermédiaires.

Des intrusions felsiques, telles que le pluton synvolcanique de Mountain à l'est (tonalite) ainsi que le pluton syntectonique de Franquet (monzonite quartzifère), sont observées dans le secteur (*figure 14A*). Le pluton de Franquet a été daté à environ 2692 Ma (David et al., 2010).

Au cours de l'Archéen tardif (orogène Kénoréenne), une compression orogénique nord-sud responsable du métamorphisme au faciès du schiste vert a déformé les différentes lithologies, engendrant des discontinuités crustales orientées NW-SE à E-W telles que le corridor de déformation de Cameron (CDC) (Daigneault et al., 1990) (*figure 14A*). Ces zones de déformation intense présentent une structure anastomosée et un pendage subvertical avec des indicateurs cinématiques indiquant un déplacement coulissant dextre. Le CDC se caractérise également par un magnétisme très élevé. Par la suite, la faille senestre de Opawica-Wedding orientée NE-SO déplace sur plus de 4-5 km les roches archéennes de la région (dont le CDC) (*figure 14A*).



Une auréole métamorphique au faciès des amphibolites est présente autour du pluton de Franquet (Proulx, 1989; Daigneault et al., 1990). Une carbonatite (Carbonatite de Grevet) et des roches métasomatiques associés recoupent les roches archéennes de la région (*figure 14A et B*). L'intrusion est probablement associée à la circulation d'un fluide hydrothermal carbonaté de fin de cristallisation caractérisé par de fortes concentrations de lanthanides et de fer. Le liquide aurait circulé le long des plans de fractures et de schistosité pour former les dykes de carbonatites, des veines de carbonates (ankérite et sidérite) à magnétite et des veinules de magnétite (Mercier, 1990; Proulx, 2010). Le tout est recoupé par des dykes de diabase protérozoïques de direction NE-SO.

Minéralisation en ÉTR

Le secteur à l'étude présente un total de 11 indices d'ÉTR dont la somme des ÉTR dépasse 1700 ppm (SIGEOM, 2023) (*figure 14A*). L'intérêt pour le secteur est dû à la découverte d'un affleurement de carbonatite en 1988 lors d'une campagne de cartographie régionale réalisée par le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec au SE du lac Cameron (Proulx, 1989). Ce secteur est par la suite prospecté par la compagnie SOQUEM qui réalise des tranchées et des forages montrant des teneurs en ÉTR (Gagnon, 1988; Mercier, 1990). La minéralisation en ÉTR est associée à la magnétite en amas, dans des fractures ou dans des veines de quartz-carbonates le plus souvent encaissées dans du basalte avec des valeurs atteignant plus de 6 % ÉTR_{total} (Mercier, 1990).

Lors d'une campagne de prospection réalisée en 2000, l'indice Proulx est défini par des minéralisations qui semblent disséminées dans les dykes et veines de carbonatites ou dans des veines carbonatées (ankérite, sidérite) et/ou riches en magnétite (Proulx, 2010). Une analyse y titre 7,49 % ÉTR. Par la suite en 2008, Golden Valley Mines Ltd. découvre par forage l'indice d'ÉTR GLU-08-2 (Lacey et al., 2011).

Une nouvelle campagne menée par Ressources Kirrin Inc. en 2010 sur la propriété Grevet permet d'identifier les indices Proulx N et Proulx SE (Proulx, 2010). En juillet 2011, pour donner suite aux découvertes de Proulx, Ressources Géoméga inc. effectue des travaux de prospection et de reconnaissance géologique à l'ouest de Lebel-sur-Quévillon sur la propriété Émilie, mettant en évidence une anomalie aéromagnétique subcirculaire (qui coïncide avec le Pluton de Franquet) similaire à celle du gisement de Montviel à 45 kilomètres au nord-ouest (Gauthier et Gauthier, 2012).

La prospection sur la propriété Émilie a mis en évidence la présence de dykes, veines et veinules de carbonatites, dont certains ont donné de bonnes teneurs en ÉTR. Deux nouveaux indices sont répertoriés dans le secteur (Emilie-DF-059 et Emilie-DF-025). Le premier indice est composé de dykes de carbonatite d'une puissance de 5 à 15 cm, dont un échantillon à plus de 0,5% ÉTR_{total}. Le second indice (DF-059), au nord du projet, est probablement un dyke de carbonatite ferrifère et se situe dans une monzonite quartzifère, mais a été interprété comme un horizon de formation de fer carbonaté.

En 2014, de nouveaux indices d'ÉTR sont découverts plus à l'est sur la propriété Florence par Adventure Gold (Félicée, Malikovsky, Aribou et Liaminou) (Guay et Riopel, 2016). Ils sont principalement retrouvés dans des dykes de carbonatite dont la puissance varie de quelques décimètres à 1,1 mètre (l'indice Aribou), dans des brèches et dans des veinules de magnétite. Les échantillons E5746586 et E5746589 prélevés à l'indice Aribou titrent à 4,04% et 7,95% ÉTR_{total}. Un minéral rouge non identifié est présumé contenir les ÉTR. De fortes concentrations en gallium sont également mesurées à Liaminou (160 ppm). L'indice Malikovsky a retourné 6,96% ÉTR.

L'ensemble de ces indices est possiblement associé à la mise en place de la Carbonatite de Grevet bien que les données soient insuffisantes pour confirmer cette hypothèse, notamment pour les indices les plus éloignés de la carbonatite.

2.3 Problématique (tirée de Legault, 2023)

Ce stage sur les minéraux critiques et stratégiques (MCS) porte principalement sur les gîtes d'ÉTR. La problématique a été présentée de façon plus exhaustive dans Legault et al. (2022) et seulement les caractéristiques importantes pour la compréhension des interprétations seront présentées ici.

Pour les carbonatites, les ÉTR (surtout légers) se trouvent généralement dans les zones bréchiques, les dykes radiaux et les « cones sheets » (*figure 15*) (Richardson et Birkett, 1996). Les zones enrichies en ÉTR peuvent être distales aux intrusions et se retrouvent habituellement dans les faciès les plus fractionnés (ferrocarbonatite). Les minéraux habituellement porteurs d'ÉTR sont la monazite, la bastnäsite et la parisite (Simandl et Paradis, 2018). Les pyrochlores, l'apatite et les carbonates peuvent aussi incorporer une partie des ÉTR (Atencio et al., 2010). Les fénites associées aux carbonatites sont généralement anormales en ÉTR, mais aucune mine d'ÉTR n'exploite des fénites à ce jour (Elliott et al., 2018).

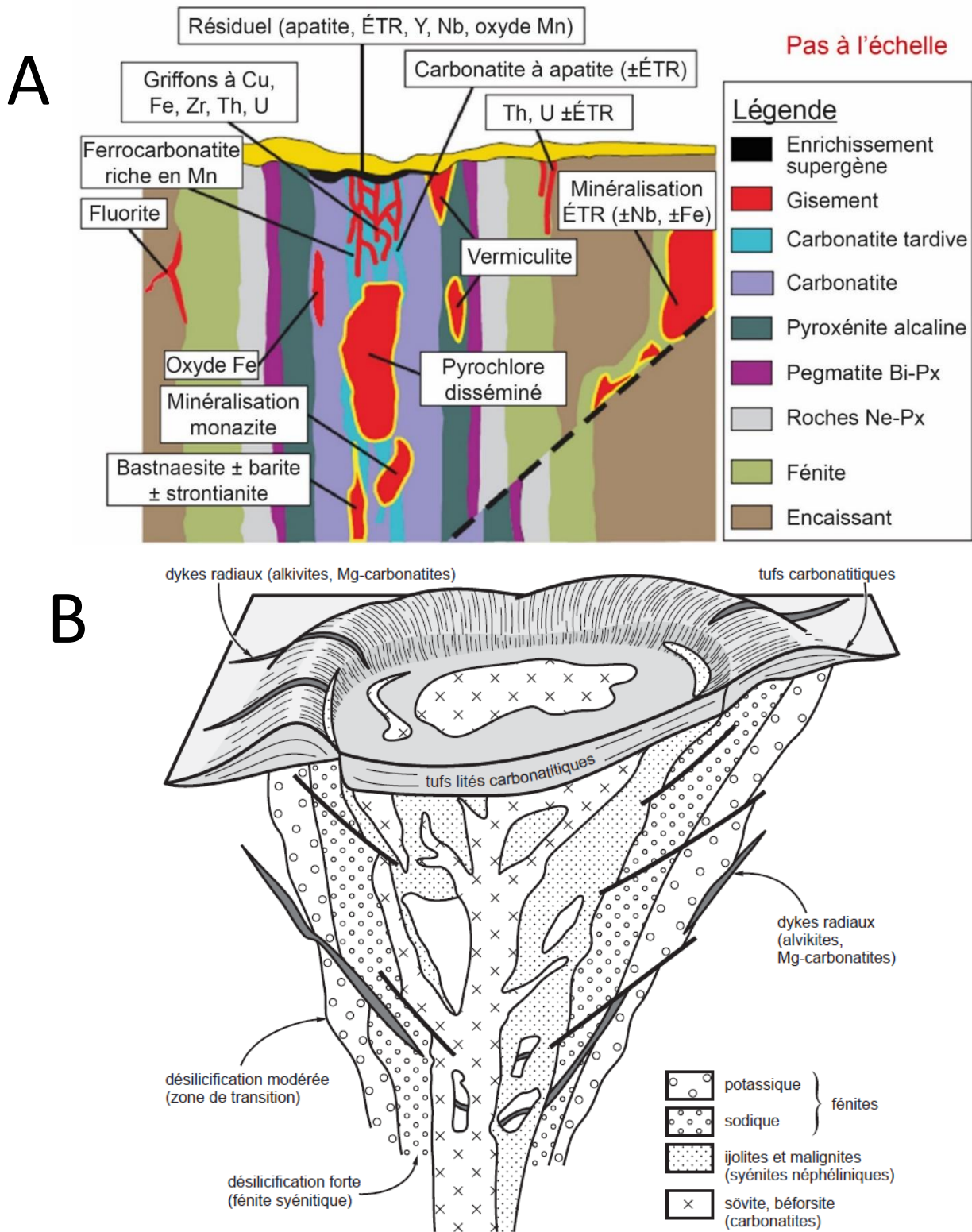


Figure 15. Illustrations montrant la répartition des ressources minérales selon les lithologies et les contacts géologiques des complexes alcalins à carbonatites. Modifiée de Simandl et Paradis (2018) (A) et Jébrak et Marcoux (2008) (B).

Ces fénites sont les roches encaissantes immédiates des intrusions. Elles sont métasomatisées et enrichies en éléments alcalins. Généralement, elles sont d'étendues plus grandes que les carbonatites associées et elles sont caractérisées par la présence de feldspath alcalin, de phlogopite, d'amphibole et de pyroxène sodique et de calcite ainsi que de nombreux minéraux accessoires comme l'hématite, l'apatite, la titanite et d'autres minéraux incorporant du Nb et des ÉTR (monazite, bastnäsité, pyrochlore, ...) (Zharikov et al., 2007; Elliott et al., 2018). Les fénites sont formées par l'échange d'éléments chimiques entre les roches encaissantes et les fluides magmatiques hydrothermaux dérivés des intrusions de magmas carbonatés. On observe toutefois généralement une zonation avec une fénitisation sodique distale précoce et une fénitisation potassique proximale tardive par rapport à l'intrusion de carbonatite (Elliott et al., 2018).

2.4 Matériel et méthode :

Les échantillons étudiés proviennent de la campagne de cartographie de Valdenaire (2019) et présentent des carbonatites ainsi que de la roche encaissante (11 échantillons). La préparation des échantillons pour la confection des lames minces et pour l'analyse chimique a été faite dans le cadre de ce stage. Les paramètres des analyses chimiques sont comme dans la section précédente.

Résultats

Compilation des travaux antérieurs

Dans un premier temps, un travail de compilation et de mise en plan des analyses géochimiques d'ÉTR et des mesures de dykes/veines/fractures de carbonates-magnétite a été réalisé sur le secteur du lac Cameron à partir des travaux réalisés dans la région du lac Cameron et récupérés sur le SIGEOM ainsi que des travaux de Valdenaire (2019). Le résultat de la compilation géochimique est synthétisé dans la *figure 16*. Au total 294 analyses ont été compilées dont 35 échantillons avec des teneurs en ÉTR supérieures au seuil indiciel. On note que certaines de ces valeurs se situent à l'extérieur des indices du SIGEOM.

La compilation des mesures des structures minéralisées est présentée à la *figure 14B*. On y note que ces structures semblent montrer une orientation préférentielle plutôt NO-SE ce qui est confirmée par la rosace et le stéréonet (*figure 17*).

Dans le secteur la schistosité est généralement de la même direction (Proulx, 1989) ce qui est confirmé par les observations de Mercier (1990), Proulx (2010) et Valdenaire (2019) qui indiquent que les injections se font souvent parallèles à celles-ci.

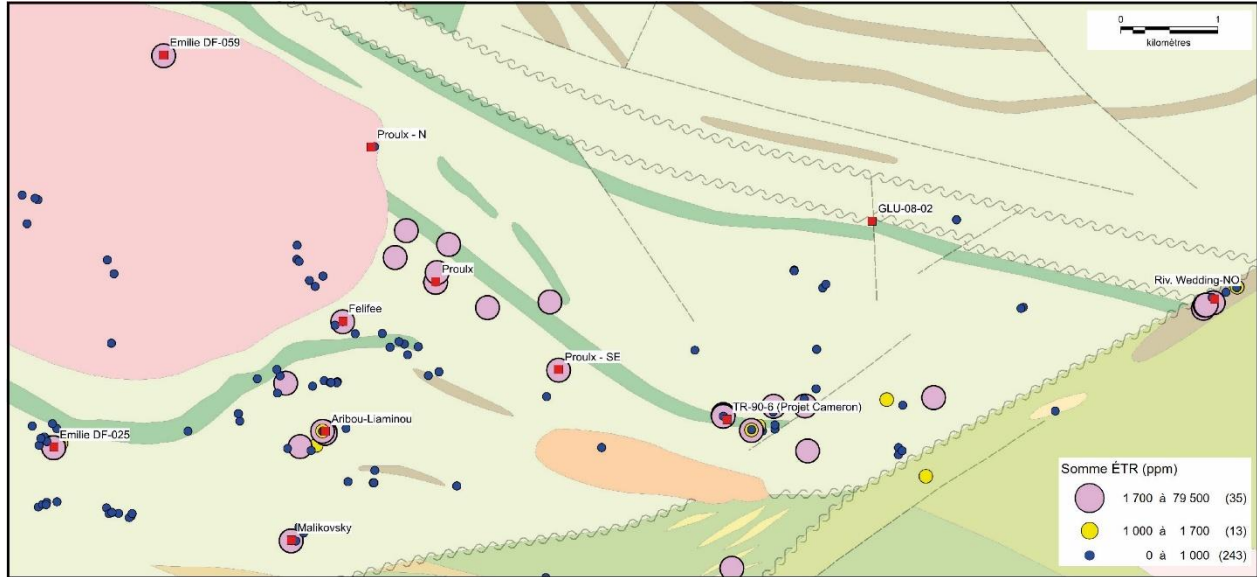


Figure 16. Compilation des analyses géochimiques du secteur à l'étude montrant la localisation des valeurs de la somme des ÉTR supérieures à 1700 ppm. Trois échantillons n'ont pas été analysés pour les ÉTR.

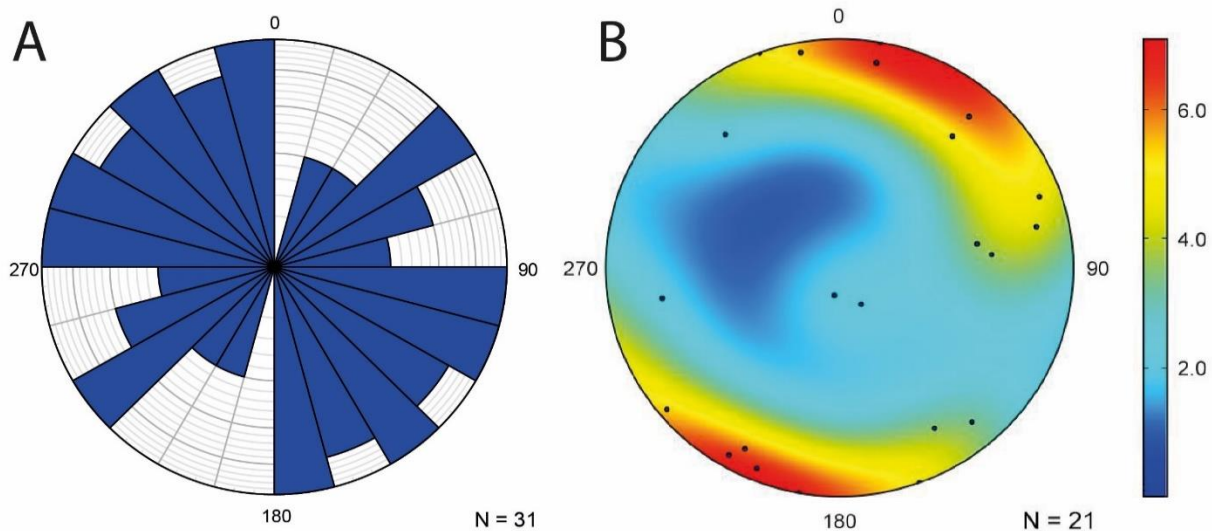


Figure 17. Compilation des mesures de dyke/veine/fracture de carbonates-magnétite avec et sans pendage sur une rosace (A) et seulement celles avec pendage sur un stéréonet (B). La méthode de concentration des pôles modifiée de Kamb fut utilisée.

Bien que ces intrusions centimétriques à métriques pourraient représenter des dykes radiaux et des « cones sheets », la présence d'une foliation vient sûrement faciliter la mise en place de ces injections et donc crée un biais vers la direction NO-SE. De plus, un total de 7 géofiches associées à 15 analyses chimiques et 11 lames minces ont été générées pour les indices Proulx N, Proulx, Proulx SE, 2010MP02, Aribou et Liaminou suite aux observations de terrain de Valdenaire (2019) (*figure 18 et annexe 1*).

Après consultation du LIDAR, du levé aéromagnétique régional, des géofiches et des analyses géochimiques compilées, de nouveaux affleurements furent sélectionnés pour une future campagne de cartographie et d'échantillonnage² (*figure 18*).

Examen pétrographique

Les observations associées aux onze (11) lames minces sont classées selon l'indice de l'affleurement échantillonné par Valdenaire (2019), soit Proulx N, Proulx, Proulx SE, 2010MP02, Aribou et Liaminou, respectivement associés aux géofiches 1001, 1002, 1003, 1004, 1006 et 1007. La lithologie et la localisation au sein de l'affleurement sont précisées pour chaque lame. Leur localisation précise au sein des affleurements peut être visualisée à l'*annexe 1*. Le *tableau 4* synthétise les pourcentages de minéraux estimés dans chaque lame. Les plus hautes teneurs (> 1% ÉTR_{total}) sont associées aux dykes de carbonatite (1004B, 1007B) et des veines de carbonates-magnétite (1001C, 1002B) (*tableau 4*). Généralement ces roches sont moyennement hématisées et montrent de hautes concentrations en carbonates (calcite et carbonates de fer), en magnétite, en plagioclase (albite) et en quartz avec moins fréquemment des pyroxènes, des amphiboles bleutées (localement altérées en chlorite), du rutile et de la pyrite (*figure 19a,b*). Les roches encaissantes de ces structures montrent une altération variable en carbonates ainsi qu'en amphiboles bleues et phlogopites (*figure 19c,d*). Au microscope électronique à balayage, Valdenaire (2019) avait observé, comme minéraux porteurs des ÉTR dans les injections de carbonates, surtout la bastnäsité, la parisite et la monazite qui peuvent atteindre jusqu'à 2 mm de diamètre (*figure 20*)

² Une campagne de terrain était prévue pour l'été 2023, mais elle a dû être annulée en raison des feux de forêt qui sévissaient dans le secteur. Les travaux de terrain devraient être reportés à l'été 2024.

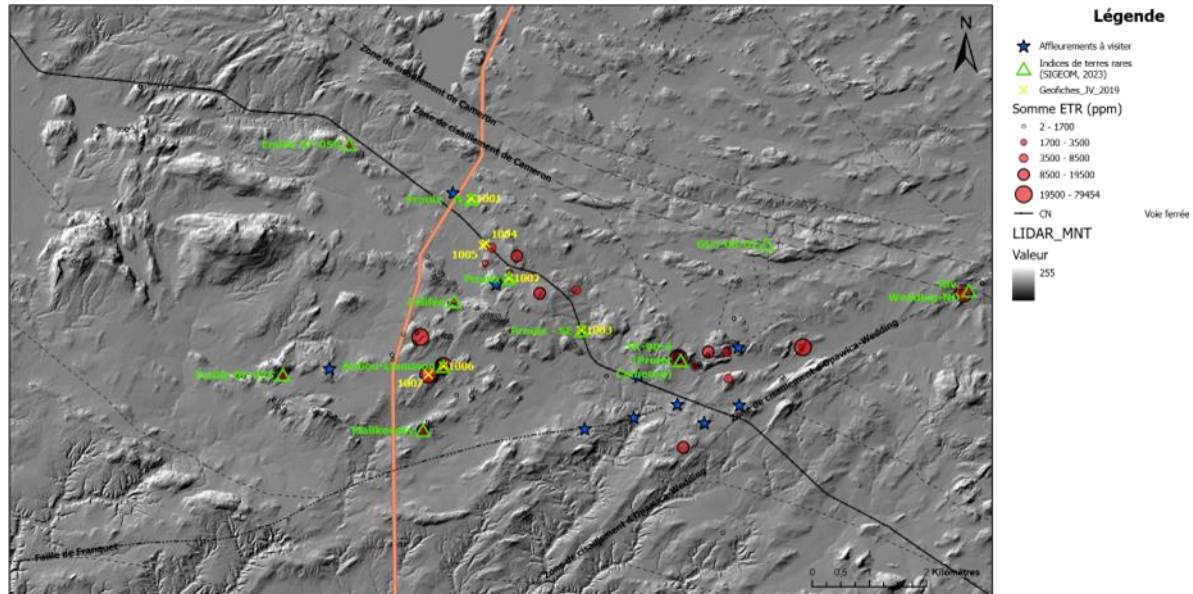


Figure 18. Carte des indices d'ÉTR avec les numéros de géofiche associés sur fond LIDAR. Les affleurements à visiter sont surtout associés à des hauts topographiques à l'intérieur de la Carbonatite de Grevet.

Tableau 4. Estimation des pourcentages des minéraux identifiés dans chaque lame. S : Sud, N : Nord, BO : Bordure Ouest, MG-CB : Magnétite-Carbonates. Hématitisation - + = faible; ++ = modérée. Les échantillons en gris ont des concentrations d'ÉTR_{total} > 1%.

Numéro de lame mince	2019-JV-1001A-B5	2019-JV-1001B-B4	2019-JV-1001C-B1	2019-JV-1002A-A2	2019-JV-1002B-A1	2019-JV-1002C-A3	2019-JV-1003B-E1	2019-JV-1004B-C1	2019-JV-1006B-F4	2019-JV-1007B-D7	2019-JV-1007C-D5
Lithologie	Granodiorite	Brèche	Veine	Basalte	Veine MG-CB	Veine MG-CB	Carbonatite	Carbonatite	Carbonatite	Carbonatite	Carbonatite
Indice	Proulx N	Proulx N	Proulx N	Proulx	Proulx	Proulx	Proulx SE	2010MP02	Aribou	Liaminou	Liaminou
Localisation échantillon	Contact brèche	Veine 3	Veine 1	Encaissant	Rainure 1	Rainure 2	Dyke S	BO du dyke	Rainure A	Dyke S	Dyke N
Carbonates	5	56	25	20	50	30	80	55	80	80	50
Magnétite	5	5	10	10	20	15	20	10	10	10	5
Plagioclase	65	20	10	23	15	29	---	30	---	---	20
Quartz	10	10	15	20	13	25	---	---	5	---	23
Pyroxènes	---	5	10	---	---	---	---	3	5	---	---
Amphiboles	5	---	10	5	---	---	---	---	---	10	---
Chlorite	5	---	10	---	1	---	---	---	---	---	---
Rutile	2	2	---	---	1	1	---	1	---	---	1
Pyrite	3	2	10	2	---	---	---	1	---	---	1
Phlogopite	---	---	---	20	---	---	---	---	---	---	---
Hématitisation	---	x	x	---	xx	x	x	xx	x	xx	xx

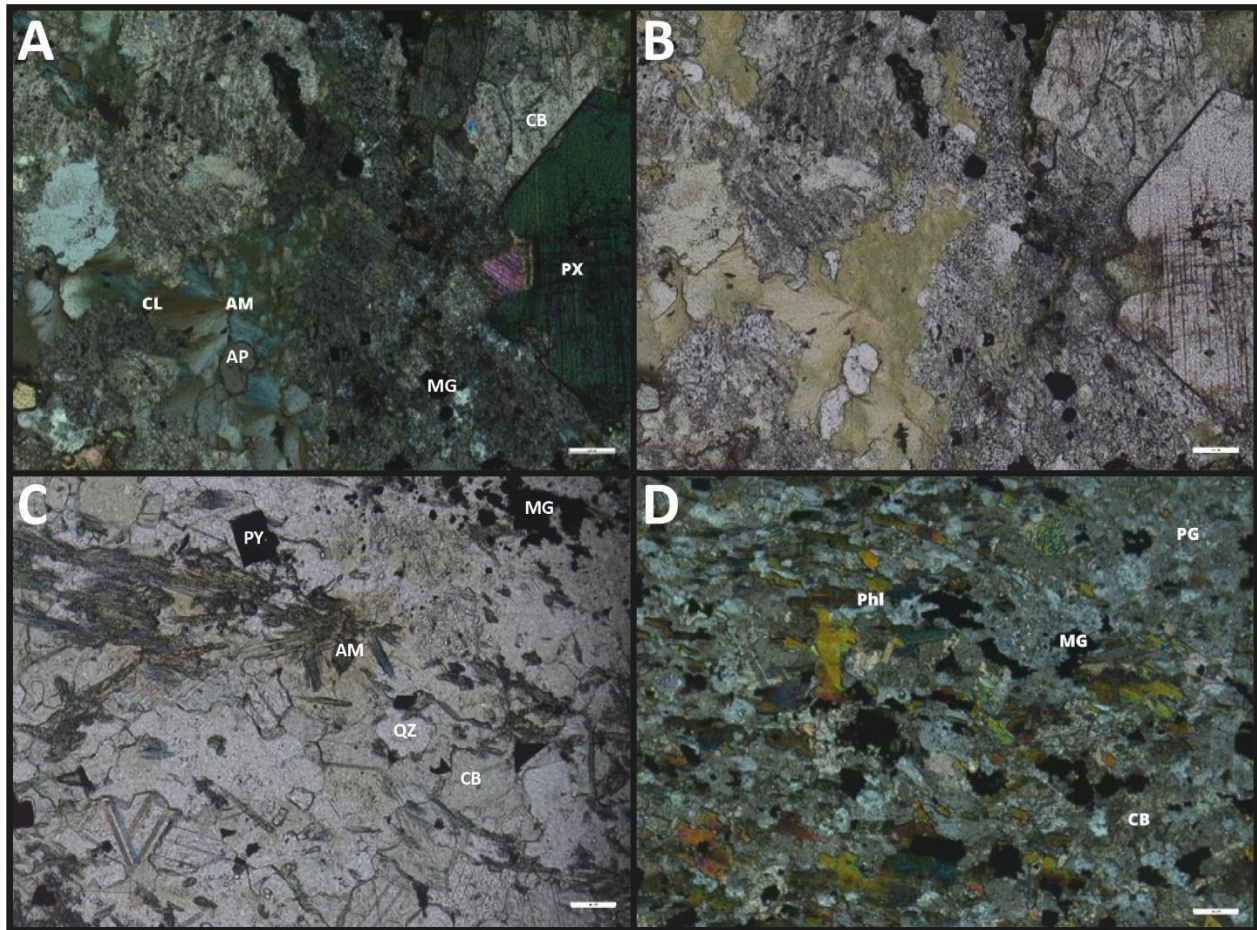


Figure 19. Photomicrographies de veines de magnérite-carbonates et de fenites. A) Veine de magnérite (MG) – carbonates (CB) avec présence de pyroxène (PX) et amphibole (AM) sodique, et apatite (AP). Noter que l'amphibole est altérée en chlorite (CL). Lumière transmise, polarisée et analysée. Indice Proulx Nord. Lame mince 2019-JV-1001C. B) Même photo sauf en lumière transmise polarisée et non analysée. C) Basalte encaissant les veines de magnérite-carbonates et montrant une altération en amphibole sodique (AM) et en carbonate (CB). QZ = quartz; PY = pyrite; MG = magnérite. Lumière transmise, polarisée et non analysée. Indice Proulx. Lame mince 2019-JV-1002A. D) Autre secteur de la même lame mince montrant plutôt une altération en phlogopite (Phl) et en carbonates (CB). Lumière transmise, polarisée et analysée. L'échelle en bas à droite sur toutes les photos mesure 200 µm.

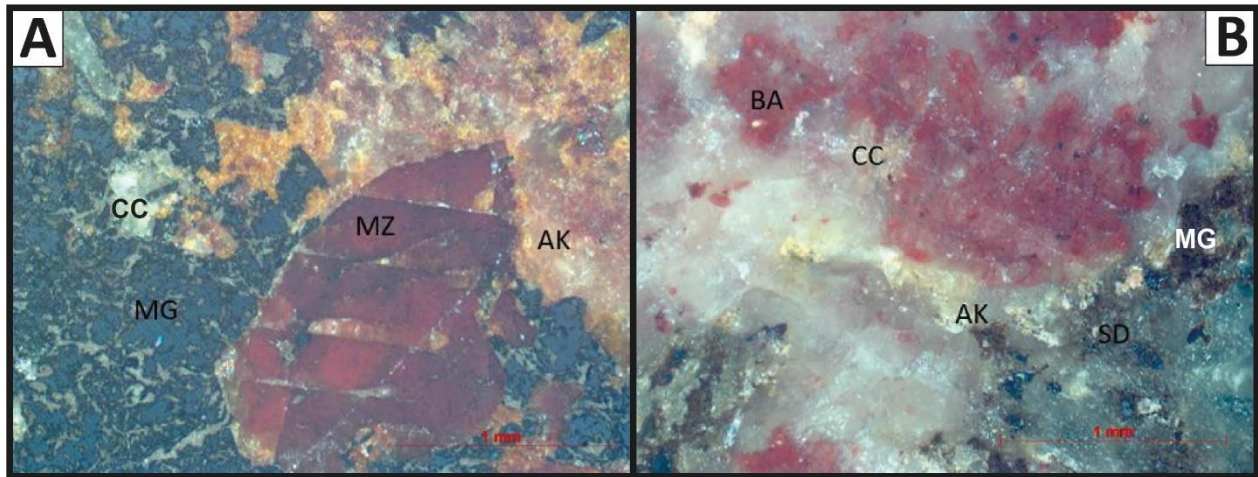


Figure 20. Photomicrographies des minéraux d'ÉTR. A) Veine de magnétite (MG) – carbonates (AK = ankérite; CC = calcite) avec présence de monazite (MZ) grossière. Indice Proulx. Échantillon 2019-JV-1002B. B) Dyke de carbonatite montrant trois types de carbonate confirmés au MEB (AK = ankérite; CC = calcite; SD = sidérite) ainsi que de la magnétite (MG) et de la bastnäsité (BA). Indice Liaminou. Échantillon 2019-JV-1007B. Lumière réfléchie sur section polie. Tirée de Valdenaire (2019)

Géochimie

Les veines de magnétite-carbonates et les dykes de carbonatite échantillonnés présentent généralement des valeurs de $\text{SiO}_2 > 20\%$ poids et donc ne peuvent être classifiées comme des carbonatites selon la classification chimique de l'International Union of Geological Sciences (IUGS) (Le Maitre, 2002). Les trois échantillons ayant $\text{SiO}_2 < 20\%$ poids (2019-JV-1002B, 1003B et 1004B) contiennent beaucoup de magnétite et donc la quantité de fer associée à la magnétite a dû être soustraite de la quantité de fer total pour la classification (Simandl et Paradis, 2018). Même avec cette correction les trois échantillons tombent dans le champ de ferrocarnatite, ce qui est cohérent avec la teinte des carbonates (*figure 21A*). Les carbonatites et les silicocarnatites ont généralement des teneurs en $\text{ÉTR}_{\text{total}}$ élevées avec des teneurs indicelles pour 7 des 11 échantillons (0,33 à 6,6%). Celles-ci montrent également d'autres caractéristiques typiques des carbonatites telles qu'un profil fractionné des ÉTR ($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 29 - 6300$), et des teneurs élevées en Ba (52 à 2 300 ppm) et Sr (202 à 35 300 ppm), ce qui permet de facilement les différencier des marbres (*figure 21B et C*). Les carbonatites et les silicocarnatites montrent localement des teneurs généralement élevées en P_2O_5 (jusqu'à 3,46 % poids ou environ 8% équivalent apatite), en Nb (< 716 ppm) et en Th (< 191 ppm), et généralement de très faibles concentrations en K_2O (< 1 % poids), Rb (< 35 ppm) et Ta (< 5 ppm).

Les analyses chimiques des basaltes altérés en bordure des injections de carbonates montrent un enrichissement en calcium, sodium, potassium et CO_2 ce qui est en accord avec les observations pétrographiques. De plus, on note un enrichissement en Ba, Sr et ÉTR légers, ce qui est attendu compte tenu de la concentration de ces éléments dans les injections.

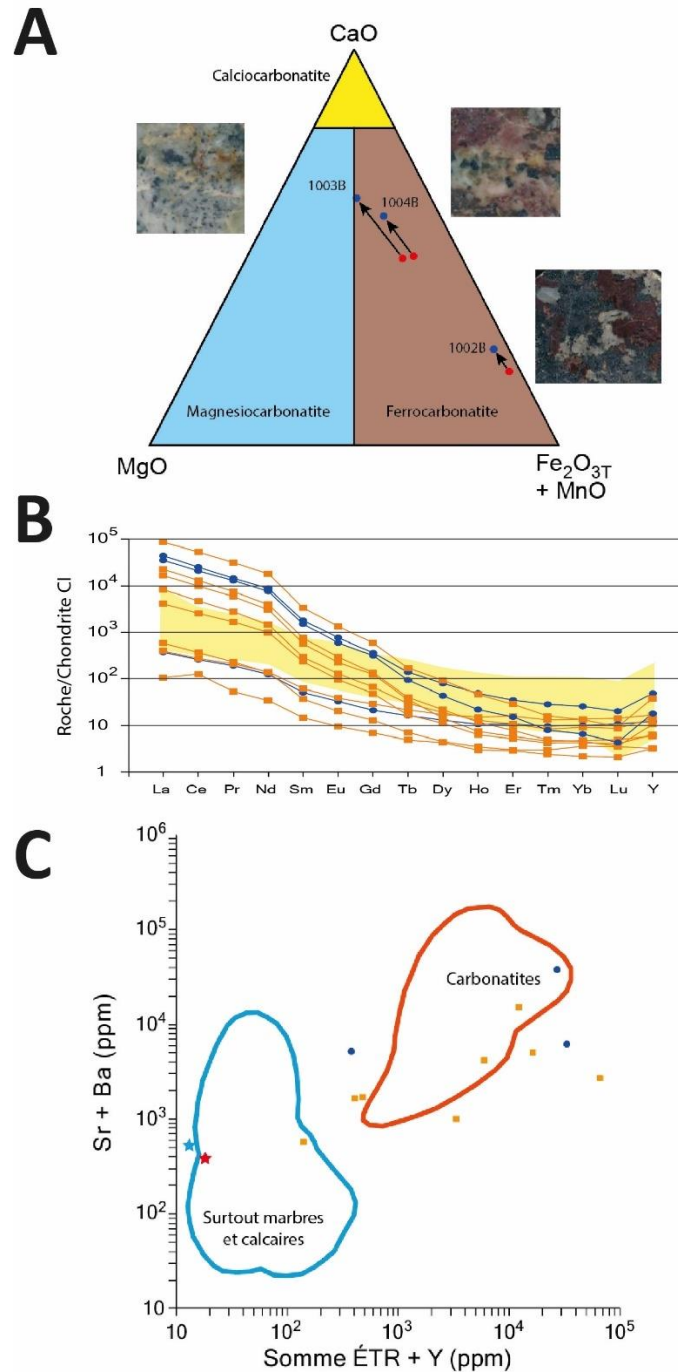


Figure 21. Diagrammes chimiques des intrusions de carbonatite (●) et de silicocarbonatite (■). A) Nomenclature de l'IUGS basée sur le % poids de Le Maitre (2002) avec correction pour présence de la magnétite (% estimé). Champ de vision des échantillons est d'environ 2 cm. B) Diagramme d'ÉTR+Y montrant le profil fractionné des intrusions. Champ en jaune provient de carbonatites non minéralisées de Homig-Kjarsgaard (1998). C) Graphique (Sr+Ba) versus (ÉTR+Y) discriminant les carbonatites des marbres et des calcaires. Champs de Samoilov (1980). Marbre grenvillien du secteur de Gatineau : étoile bleue – Hogarth, 1986; étoile rouge – Legault, 2023.

2.5 Conclusion

Au cours de ce stage, l'évaluation du potentiel en terres rares des carbonatites dans le secteur de Lebel-sur-Quévillon a été approfondie grâce à plusieurs étapes d'investigation. Tout d'abord, un inventaire des occurrences des ÉTR a été compilé en utilisant des données historiques, révélant la présence de onze (11) occurrences de terres rares déjà documentées dans la base de données SIGEOM (2023). De plus, 35 nouveaux échantillons ont montré des concentrations en ÉTR dépassant le seuil indicatif, et sept (7) géofiches ont été ajoutées au SIGEOM en se basant sur des observations effectuées par Valdenaire (2019).

Les échantillons collectés en 2019 ont été préparés et soumis à des analyses géochimiques, ce qui a permis de classer les carbonatites du secteur comme des ferrocyanatites. Sept (7) échantillons ont révélé une somme en ÉTR supérieure au seuil indicatif dans des carbonatites mais aussi dans certaines veines et brèches associées aux indices Proulx N, Proulx, Liaminou, 2010MP02 et Aribou. Onze (11) lames minces ont été préparées et examinées au microscope optique, fournissant des informations complémentaires sur la composition minéralogique des différentes lithologies.

2.6 Travaux futurs

Plusieurs nouveaux affleurements ont été sélectionnés pour une future campagne de cartographie et d'échantillonnage qui devrait être effectuée à l'été 2024. De plus, des analyses à la microsonde devraient être effectuées sur les minéralisations en ÉTR afin de mieux déterminer la minéralogie et la distribution élémentaire des ÉTR. Au moins une compagnie d'exploration a effectué des travaux de terrain dans le secteur pour identifier d'autres minéralisations d'ÉTR à l'automne 2023. Ces travaux devront être ajoutés à la compilation et des modifications devront possiblement être apportées au programme de terrain prévu en 2024.

Bibliographie

- Atencio, D., Andrade, M.B., Christy, A.G., Giere, R. et Kartashov, P.M., 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist* 48 (3) : 673–698.
- Ballouard, C., Poujol, M. Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R. et Vignerresse, J.-L., 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44 (3) : 231-234.
- Boily, M., Pilote, P. et Raillon, H., 1989. La métallogénie des métaux de haute technologie en Abitibi-Témiscamingue. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MB 89-29. 118 pages et 1 plan.
- Boily, M., 1993. Pétrogenèse du batholite de Preissac-Lacorne : implications pour la métallogénie des gisements de métaux rares. Ministère des Ressources naturelles du Québec. ET 93-05, 69 p.
- Boily, M. et Gosselin, C., 2004. Les principaux types de minéralisations en métaux rares (Y-Zr-Nb-Ta-Be-Li-ETR) du Québec. Ministère des Ressources naturelles, Faune et Parcs du Québec. ET 2004-01, 47 p.
- Breaks, F.W., Selway, J.B. et Tindle, A.G., 2003. Fertile Peraluminous Granites and Related Rare-Element Mineralization in Pegmatites, Superior Province, Northwest and Northeast Ontario: Operation Treasure Hunt. Ontario Geological Survey. Open File Report 6099, 213 p.
- Breaks, F.W., Selway, J.B. et Tindle, A.G., 2005. Fertile peraluminous granites and related rare-element pegmatites, Superior Province of Ontario. *Dans*: Linnen, R.L. and Samson, I.M., eds., Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17: 87-125.
- Černý, P., 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part II : Regional to global environments and petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18 (2) : 68-81.
- Černý, P. et Ercit, T.S., 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43 (6) : 2005-2026.
- Chagnon, J.Y., 1968. Régions des lacs des Quinze et barrière, comté de Témiscamingue. Ministère des Richesses naturelles du Québec. RG 134. 120 pages et 1 plan.

- Daigneault, R., St-Julien, P. et Allard, G. O., 1990. Tectonic evolution of the northeast portion of the Archean Abitibi greenstone belt. Chibougamau area, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27(12): 1714-1736.
- David, J., Vaillancourt, D., Bandyayera, D., Simard, M., Goutier, J., Pilote, P., Dion, C. et Barbe, P., 2010. Datations U-Pb effectuées dans les sous-provinces d'Ashuanipi, de La Grande, d'Opinaca et d'Abitibi en 2008–2009. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, RP 2010-11, 38 p.
- Elliott, H.A.L., Wall, F., Chakhmouradian, A.R., Siegfried, P.R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A.A., Marks, M.A.W., Dowman, E. et Deady, E., 2018. Fenites associated with carbonatite complexes : a review. *Ore Geology Reviews*, 93 : 38-59.
- Ercit, T.S., 2005. REE-enriched granitic pegmatites. Dans : Linnen, R.L. et Samson, I.M., édés., *Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits*. Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17 : 175-199.
- Feng, R. et Kerrich, R., 1991. Single zircon age constraints on the tectonic juxtaposition of the Archean Abitibi greenstone belt and Pontiac Subprovince, Quebec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (11) : 3437-3441.
- Feng, R. et Kerrich, R., 1992. Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac Subprovince, Superior Province, Canada: Implications for tectonic history and source regions. *Chemical Geology*, 98 (1-2) : 23-70.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J. et Frost, C.D., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42-11 : 2033-2048.
- Gagnon, D.Y., 1988. Projet Cameron (100949): Prospection, cartographie et forage. SOQUEM. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 49671.
- Gauthier, J. et Gauthier, M., 2012. Travaux d'exploration 2011, Propriété Emilie. GéoMéga. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 66768.
- Guay, M., et Riopel, J. (2016). Rapport d'une campagne de prospection été-automne 2014. Adventure Gold. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 69361.

- Godet, A., Guilmette, C., Marsh, J.H., Rottier, B., Tinkham, D., Malta, I.S., Rehm, A., Jorgensen, T.R.C., Hamilton, M.A., Ribeiro, D. et Beaudoin, G., 2023a. Origin, nature, and evolution of the northern Pontiac subprovince, Canada. *Precambrian Research*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107169>.
- Godet, A., Smit, M., Guilmette, C. et Fournier-Roy, F., 2023b. La longue vie du Batholite de Decelles, Pontiac, Québec : les grenats à notre rescousse! Photoprésentation Québec Mines+Énergie 2023.
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J. et Galieue, X., 2019. Re-Assessing the European Lithium Resource Potential – A Review of Hard-Rock Resources and Metallogeny. *Ore Geology Reviews* 109 : 494-519. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.015>.
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M.-C., Mercier-Langevin, P. et Davis, D.W., 2001. Géologie de la colline Masson (33F/09), de la passe Awapakamich (33F/10), de la baie Carbillet (33F/15) et de la passe Pikwahipanan (33F/16). Ministère des Ressources naturelles du Québec. RG 2000-10. 70 p.
- Hocq, M. et Verpaelst, P., 1994. Les sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Dans : Géologie du Québec. Les Publications du Québec. MM 94-01 : 21-38.
- Hogarth, D.D. et Rushforth, P., 1986. Carbonatites and fenites near Ottawa, Ontario and Gatineau, Québec. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada – Canadian Geophysical Union Joint Annual Meeting, Ottawa'86, Field Trip 9B, Guidebook, 22 p.
- Hornig-Kjarsgaard, I., 1998. Rare earth elements in Sövitic carbonatites and their mineral phases. *Journal of Petrology*, 39: 2105–2121.
- Lacey, M., Boubakour, M. et Rosatelli, M., 2011. Projet Luciana: Journaux de sondage, Campagne 2008 Canton Grevet. Golden Valley Mines Ltd. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 65642.
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J.F. et Doucelance, R., 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208-235.

- Legault, M., Da Rosa, L., Parisot, F. et Potvin, R., 2022. Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de terrain. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec, MB 2022-01.
- Legault, M., 2023. Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de terrain. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec, MB 2023-01.
- Le Maitre, R. W., 2002. *Igneous Rocks : A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge, UK : Cambridge Univ. Press.
- Linnen, R.L., Van Lichtenvelde, M. et Černý, P., 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8 : 275-280.
- London, D., 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews* 101 (octobre): 349-83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020>.
- Machado, N., Gariépy, C., Philippe, S. et David, J., 1991. Géochronologie U-Pb du territoire québécois : Fosses du Labrador et de l'Ungava et Sous-province de Pontiac. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. MB 91-07. 50 pages.
- Mercier, D., 1990. Projet Cameron (100949): Rapport de la campagne de géologie et prospection. SOQUEM. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 50830.
- MERN, 2020. Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025. Gouvernement du Québec. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/energie-ressources-naturelles/publications-adm/plan-strategique/PL_valorisation_mineraux_critiques_strategiques.pdf?1618857094
- Mortensen, J.K. et Card, K.D., 1993. U-Pb age constraints for the magmatic and tectonic evolution of the Pontiac Subprovince, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30: 1970-1980.
- MRNF, 2023. Provinces géologiques du Québec. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec. https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CA_subdivisions_geologiques_MRNF.pdf
- Mulja, T., Williams-Jones, A.E., Wood, S.A. et Boily M., 1995. The rare-earth-enriched monzogranite – pegmatite – quartz vein systems in the Preissac-LaCorne Batholith, Quebec. II. Geochemistry and petrogenesis. *The Canadian Mineralogist*, 33: 817-833.

- Müller, A., Romer, R. L. et Pedersen, R. B., 2017. The Sveconorwegian Pegmatite Province – Thousands of Pegmatites Without Parental Granites. *Canadian Mineralogist*, 55 : 283-315.
- Perron, T. et Labranche, S., 2017. Indices Viau-Dallaire (Li-Ta) Lac Simard, Témiscamingue. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM69874.
- Proulx, M., 1989. Géologie de la région des lacs Esther et Wedding. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MB 89-67, 54 p.
- Proulx, M., 2010. Rapport sur la campagne de terrain phase 2. Ressources Kirrin Inc. Travaux statutaires déposés au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, GM 65258.
- Richard, P.-L., 2021. NI 43-101 Technical Report, Tansim Property. Sayona Quebec. 124 pages. <https://www.sayonaquebec.com/wp-content/uploads/2021/03/6015026-000000-40-ERA-0001-R00.pdf>
- Richardson, D.G. et Birkett, T.C., 1996. Gîtes associés à des carbonatites. Dans : Géologie des types de gîtes minéraux du Canada, O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair et R.I. Thorpe, édés. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, n° 8 : 601-619.
- Rive, M., 1975. Géologie des lacs Simard, Winawash et Decelles (Comtés de Témiscamingue et Pontiac). Ministère des Richesses naturelles du Québec. DP-338. 15 pages et 4 plans.
- Rive, M., 1994. Inventaire des roches granitoides des sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MB 92-14. 185 pages.
- Samoilov, V.S. et Smirnova, E.A., 1980. Behavior of rare earth elements in carbonatite formation and some genetic aspects of carbonatites. *Geochemistry*, 18 : 1844–1858.
- Selway, J.B., Breaks, F.W. et Tindle, A.G., 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. *Exploration and Mining Geology*, 14 (1-4) : 1-30.
- SIGÉOM, 2010a. Carte(s) géologique(s) du SIGEOM – feuillet 31M. https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/CGSIGEOM31M/CGSIGEOM31MP_LAN_1-36.pdf

- SIGÉOM, 2010b. Carte(s) géologique(s) du SIGEOM – feuillet 32F.
https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/CGSIGEOM32F/CGSIGEOM32FPLAN_1-50.pdf
- SIGÉOM, 2023. Substances métalliques. Consulté le 14 juin 2023.
https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1102_index
- Simandl, G.J. et Paradis, S., 2018. Carbonatites : related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. Applied Earth Science, 127 (4) : 123-152.
- Simmons, W. B. S. et Webber, K. L., 2008. Pegmatite genesis : state of the art. European Journal of Mineralogy, 20 (4) : 421-438.
- Steiner, B., 2019. Tools and workflows for grassroots Li-Cs-Ta (LCT) pegmatite exploration. Minerals, 9 (8). <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/8/499/htm>
- Tarnocai, D. M., 1997. Petrogenesis of the Late Archean Lac Simard Intrusive Complex, Pontiac Subprovince, Quebec. Mémoire de maîtrise, Université d'Ottawa (Canada). 324 pages.
- Valdenaire, J., 2019. Étude des indices de terres rares au Québec avec zoom sur les carbonatites de la région du lac Cameron. Rapport de stage M2, Université de Lorraine.
- Zharikov, V A, Pertsev, N N, Rusinov, V L, Callegari, E, et Fettes, D J., 2007. A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 9. Metasomatic rocks. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. 17 pages.



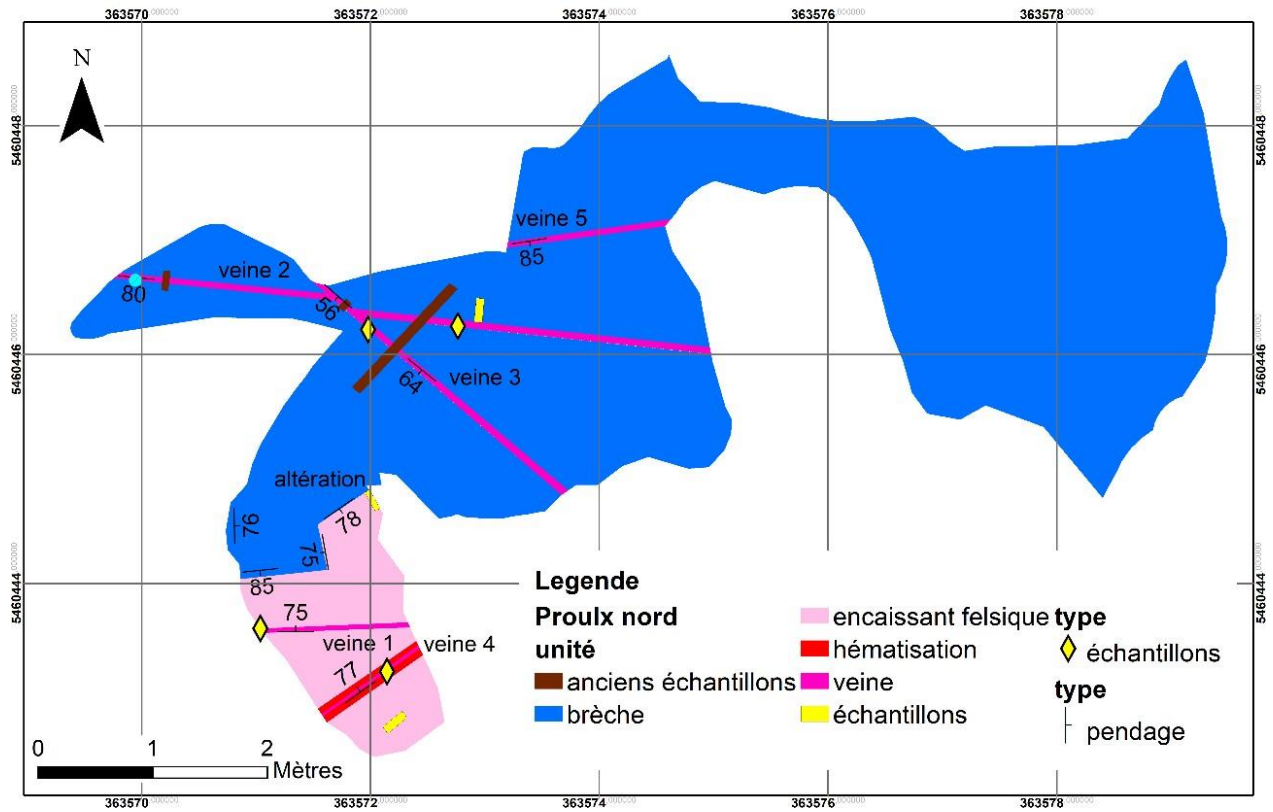
Marc Legault, géo., Ph. D.

OGQ n° 00756

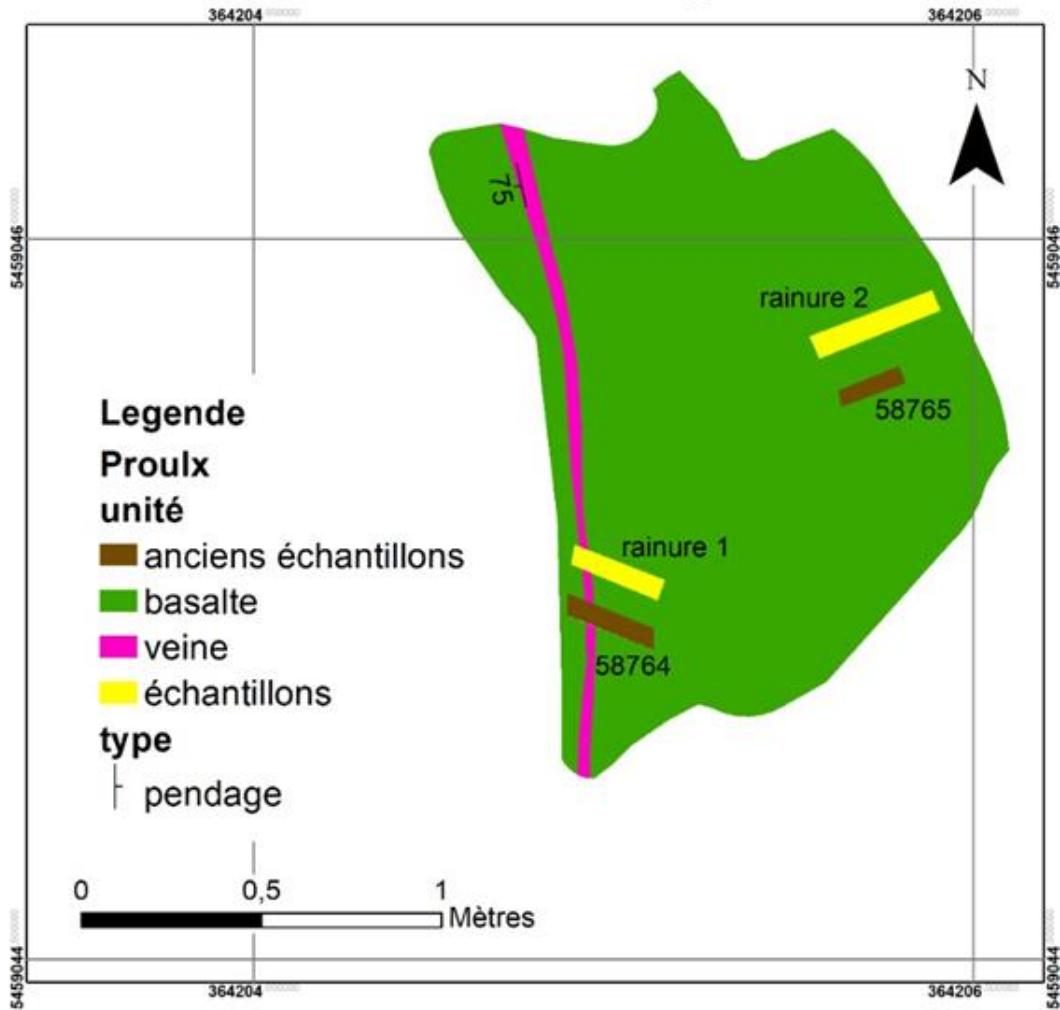
Annexe A

**Cartographie détaillée des indices d'ÉTR
par Valdenaire (2019)**

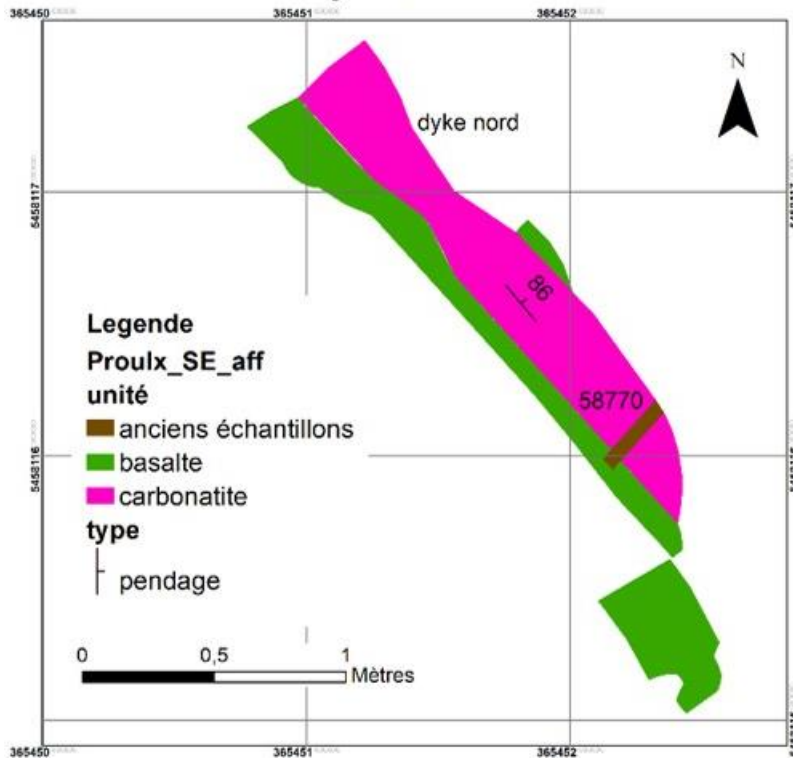
Cartographie de l'affleurement Proulx Nord



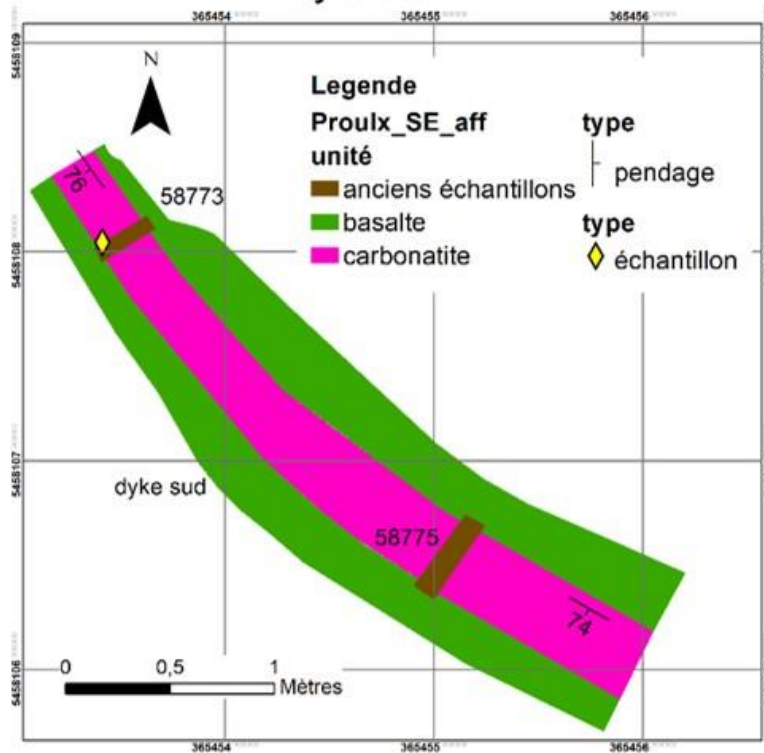
Cartographie de l'affleurement Proulx : zone d'échantillonnage



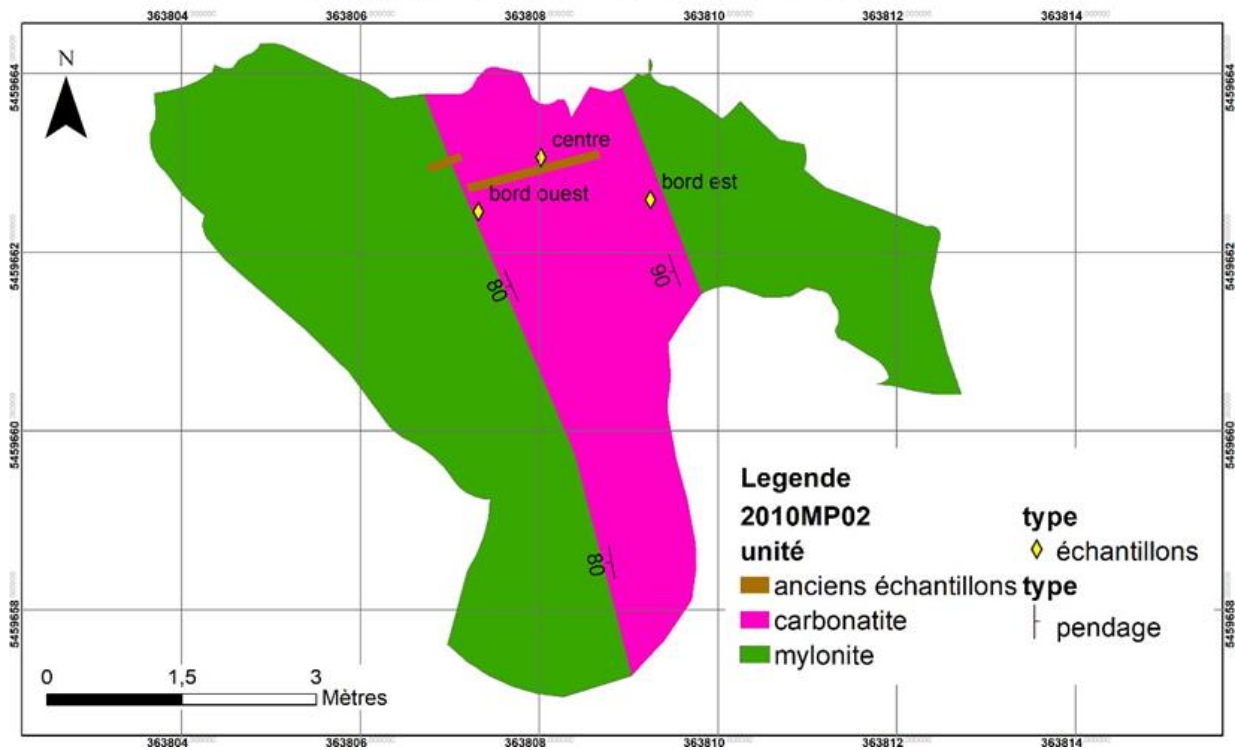
Cartographie de l'affleurement Proulx SE : dyke nord



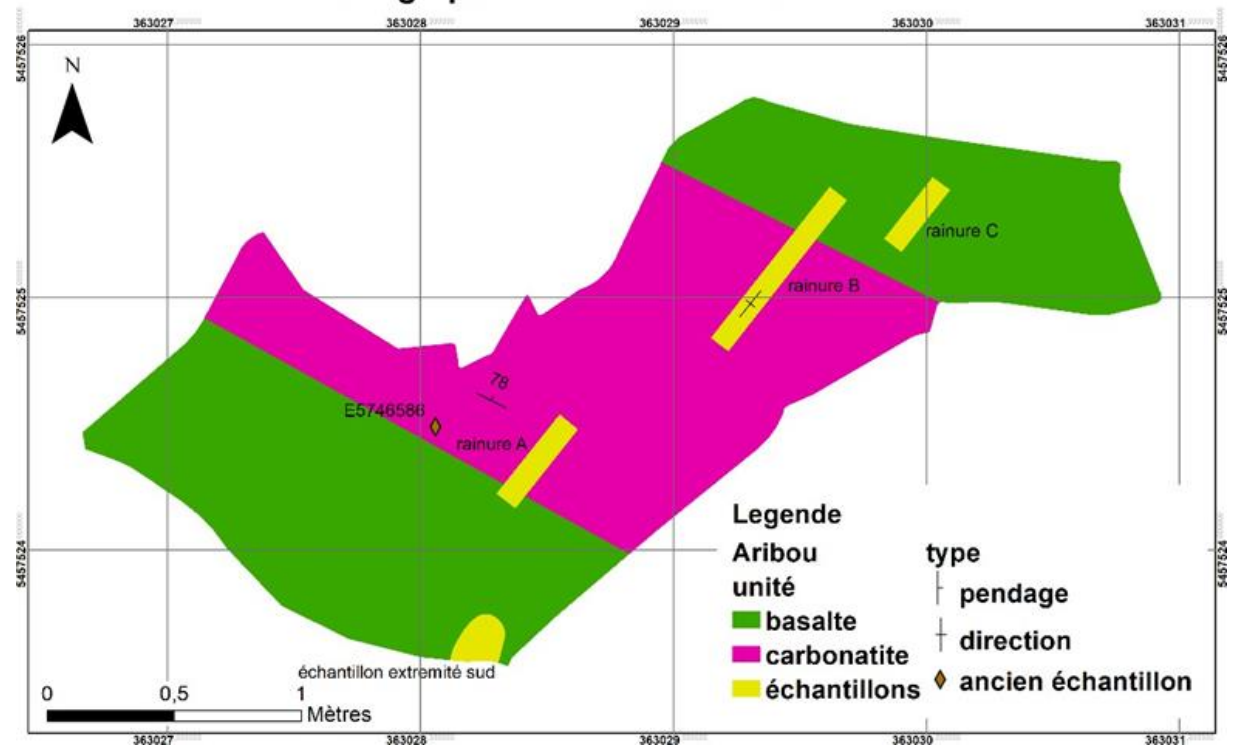
Cartographie de l'affleurement Proulx SE : dyke sud



Cartographie de l'affleurement 2010MP02



Cartographie de l'affleurement Aribou



Cartographie de l'affleurement Liaminou

