



Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Caractérisation minéralogique et géochimique des pegmatites du secteur du
Batholite de La Motte, Sous-province de l'Abitibi et son implication pour
l'exploration**

SABRINE RAJHI

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Minéral

Avril 2024

© Sabrina Rajhi, 2024.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Caractérisation minéralogique et géochimique des pegmatites du secteur du Batholite de La Motte, Sous province de l'Abitibi et son implication pour l'exploration

présenté par **Sabrine RAJHI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Jean-François BOULANGER, président

Marc LEGAULT, membre et directeur de recherche

Hubert MVONDO, membre et codirecteur de recherche

Robin POTVIN, membre et codirecteur de recherche

Li Zhen CHENG, membre externe

DÉDICACE

..... À ma chère mère

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de recherche, Marc Legault, pour sa disponibilité, son accompagnement et son soutien constant durant toute la période de ma maîtrise. Je suis également profondément reconnaissante pour le soutien et la disponibilité offerts par mes co-directeurs Hubert Mvondo et Robin Potvin.

Un grand merci aux équipes de l'IRME, de l'URSTM et de l'UQAT pour leur aide et leur gentillesse.

Je souhaite aussi reconnaître le soutien financier du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts ainsi que celui d'Éléments08, qui ont joué un rôle essentiel dans le financement de ce projet.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à mes ami(e)s, pour les moments précieux passés ensemble et les pauses pleines de réconfort qui ont été essentielles pour me revigorer et m'aider à rester engagée dans ce projet.

Enfin, un remerciement tout spécial à ma famille. Leur présence constante, bien que lointaine, et leur encouragement sans faille ont été des piliers de ma motivation et ont significativement contribué à ma réussite.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire présente une analyse pétrographique et géochimique des pegmatites associées au Batholite de La Motte (BLM), Sous-province de l'Abitibi, avec une emphase particulière sur leur potentiel en minéraux critiques et stratégiques (MCS), notamment le lithium, et leurs liens génétiques. L'étude s'aligne avec les objectifs du Plan québécois de valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025, soulignant l'importance nationale et internationale de ces ressources pour les technologies de pointe.

Situé à l'est de Rouyn-Noranda, le BLM représente une zone riche en pegmatites LCT (Li-Cs-Ta), qui lui sont spatialement associées. L'accessibilité et la localisation précise de ces unités constituent le fondement géologique de cette étude, essentielle pour la prospection minière.

Les objectifs de cette recherche sont doubles. D'une part, elle cherche à élucider le lien génétique entre le BLM et les pegmatites. D'autre part, elle vise à déterminer les zones à haut potentiel de découverte de spodumène au moyen d'une cartographie ciblée et d'analyses géochimiques et minéralogiques.

Pour atteindre les objectifs de recherche, une méthodologie exhaustive a été adoptée, combinant l'étude des données antérieures, la cartographie ciblée et l'analyse minéralogique et géochimique des échantillons. La compilation des données préexistantes a offert une vue d'ensemble actualisée sur la zone d'étude, mettant en relief les travaux géologiques historiques et les analyses préalables.

Une gamme de techniques analytiques, notamment l'étude pétrographique, la coloration par le cobaltinitrite de sodium et l'analyse chromatique, a été appliquée pour examiner minutieusement la minéralogie des échantillons. De plus, l'emploi de la microsonde électronique et des analyses géochimiques a enrichi notre compréhension de la composition chimique des pegmatites et des granites concernés.

Cette étude a mis en lumière la complexité géologique, minéralogique et géochimique des pegmatites du BLM. Ces pegmatites ont des formes variées, allant d'amas stériles à des dykes. Sur la base de leur composition minéralogique, ces roches se distinguent en quatre familles comprenant des pegmatites stériles, des pegmatites à beryl, des pegmatites à colombo-tantalite et des pegmatites à spodumène.

Des variations chimiques graduelles des monzogranites du BLM aux amas pegmatitiques à contact graduel avec ces différents types de pegmatites suggèrent une source commune pour ces roches et un lien génétique entre le BLM et les différentes familles de pegmatite incluant celle à spodumène. Les analyses géochimiques ont également révélé également une diversité des ratios d'éléments incompatibles dont K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, et Zr/Hf. Ces variations montrent différents niveaux de différenciation magmatique entre les différentes familles de pegmatite qui ne se reflètent pas nécessairement par leur minéralogie.

Les dykes à spodumène se distinguent comme étant les plus fractionnés et sont caractérisés par des ratios K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf faibles en analyse de roche totale et dans les feldspaths potassiques et muscovites. L'approche méthodologique adoptée a abouti à l'établissement d'une carte de potentiel basée sur le ratio K/Rb de la roche totale, identifiant une région prometteuse pour le lithium dans le sud-est du BLM. Ces résultats renforcent l'importance de combiner des données de sources variées pour évaluer le potentiel minier d'une région.

Le travail a enrichi la compréhension de la variété et du potentiel des pegmatites liées au BLM, indiquant une évolution magmatique sur plusieurs millions d'années et accentue la nécessité de réaliser des études géochronologiques additionnelles pour mieux comprendre la genèse des pegmatites et leur lien avec le granite parent.

Pour améliorer le projet et clarifier certains points restant ambigus, il est conseillé d'adopter des méthodes d'échantillonnage plus sophistiquées comme l'utilisation d'une foreuse portative, et l'utilisation de XRF portable pour des analyses immédiates sur les minéraux. Il est également recommandé d'approfondir l'étude du dyke à spodumène intraplutonique (indice du Lac des Hauteurs) qui semble présenter des caractéristiques non conventionnelles par rapport au modèle généralement accepté.

ABSTRACT

This thesis presents a petrographic and geochemical analysis of the pegmatites associated with the La Motte Batholith (LMB), within the Abitibi Subprovince, with a particular emphasis on their potential for critical and strategic minerals (CSMs), notably lithium, and their genetic links. The study aligns with the objectives of the Quebec Plan for the Valorization of Critical and Strategic Minerals 2020-2025, highlighting the national and international importance of these resources for advanced technologies.

Located east of Rouyn-Noranda, the LMB represents a zone rich in LCT (Li-Cs-Ta) pegmatites, spatially associated with the LMB. The accessibility and precise localization of these units form the geological foundation of this study, essential for mining prospecting.

The objectives of this research are twofold. Firstly, it seeks to elucidate the genetic link between the LMB and the pegmatites. Secondly, it aims to determine the areas with a high potential for spodumene discovery through targeted mapping and geochemical and mineralogical analyses.

To achieve the research objectives, a comprehensive methodology was adopted, combining the study of prior data, targeted mapping, and mineralogical and geochemical analysis of samples. The compilation of pre-existing data provided an updated overview of the study area, highlighting historical geological work and prior analyses.

A range of analytical techniques, including petrographic study, sodium cobaltinitrite staining, and chromatographic analysis, was applied to meticulously examine the mineralogy of the samples. Furthermore, the use of the electron microprobe and geochemical analyses enriched our understanding of the chemical composition of the concerned pegmatites and granites.

This study has highlighted the geological, mineralogical, and geochemical complexity of the LMB pegmatites. These pegmatites vary in form, from barren masses to dykes. Based on their mineralogical composition, these rocks are distinguished into four families, including barren pegmatites, beryl pegmatites, columbo-tantalite pegmatites, and spodumene pegmatites.

Gradual chemical variations from the LMB monzogranites to the pegmatitic masses with a gradual contact with these different types of pegmatites suggest a common source for these rocks and a genetic link between the LMB and the different pegmatite families, including the spodumene-

bearing ones. The geochemical analyses also revealed a diversity of incompatible element ratios such as K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf. These variations show different levels of magmatic differentiation among the pegmatite families, which are not necessarily reflected by their mineralogy.

The spodumene dykes are distinguished as being the most fractionated and are characterized by low K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf ratios in whole-rock analysis and in potassium feldspars and muscovites. The methodological approach adopted resulted in the establishment of a potential map based on the whole-rock K/Rb ratio, identifying a promising region for lithium in the southeast of the LMB. These results underscore the importance of combining data from varied sources to assess the mining potential of a region.

The work has enriched the understanding of the variety and potential of pegmatites linked to the LMB, indicating a magmatic evolution over several million years and emphasizing the need for additional geochronological studies to better understand the genesis of pegmatites and their link with the parent granite.

To improve the project and clarify some remaining ambiguous points, it is advised to adopt more sophisticated sampling methods, such as the use of a portable drill, and the use of portable XRF for immediate analyses on minerals. It is also recommended to deepen the study of the intra-plutonic spodumene dyke (Lac des Hauteurs showing) which appears to exhibit unconventional characteristics compared to the generally accepted model.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Localisation et accès	2
1.3 Problématique	3
1.4 Objectifs	5
1.5 Structure du document	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Les pegmatites lithinifères	7
2.1.1 Un aperçu sur les pegmatites	7
2.1.2 Critères d'évaluation d'une région pour le potentiel des pegmatites LCT les plus fractionnées	19
2.2 Historique des principaux travaux géologiques dans la région d'étude	29
2.2.1 Zonation à l'échelle du Batholite de La Motte	32

CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	36
3.1	Compilation des données	36
3.2	Campagne de cartographie et échantillonnage.....	36
3.3	Préparation des échantillons.....	38
3.4	Étude pétrographique	39
3.4.1	Coloration par le cobaltinitrite de sodium et analyse chromatique.....	39
3.4.2	Examen au microscope optique.....	42
3.4.3	Analyse par microsonde électronique	42
3.5	Analyses géochimiques	44
CHAPITRE 4	ARTICLE: CHARACTERIZATION OF PEGMATITES IN THE LA MOTTE AREA, PREISSAC- LA CORNE PLUTONIC SUITE, ABITIBI SUBPROVINCE AND ITS IMPLICATIONS FOR EXPLORATION	45
4.1	Préambule.....	45
4.2	Résumé	45
4.3	Abstract	46
4.4	Introduction	47
4.5	Geological Context.....	48
4.5.1	Regional Geology.....	48
4.5.2	Local Geology	48
4.5.3	LMB pegmatites	52
4.6	Methods.....	55
4.6.1	Data compilation and sampling.....	55
4.6.2	Chromatic Analysis	55
4.6.3	Geochemical Analyses	56

4.6.4	Electron Probe Microprobe Analysis (EPMA)	56
4.7	Results	56
4.7.1	Petrographic characteristics.....	56
4.7.2	Geochemical Characteristics	64
4.7.3	Mineral analysis	75
4.8	Discussion	83
4.8.1	Identification of dykes with high potential for lithium mineralization discovery..	86
4.9	Conclusion.....	89
4.10	Acknowledgements	89
4.11	References	90
CHAPITRE 5	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	95
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	97
RÉFÉRENCES	99
ANNEXES	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Principales subdivisions et caractéristiques des cinq classes de pegmatites granitiques. Traduit de Černý et Ercit, 2005.	9
Tableau 2.2. Classification des pegmatites granitiques à éléments rares : sous-classe à lithium. Traduit de Černý (1991a, c).	12
Tableau 2.3. Valeurs limites des plutons sources (monzogranite) 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 (2023a).....	23
Tableau 2.4. Comparaison de l'abondance moyenne d'éléments rares et ratios sélectionnés dans: la croûte continentale supérieure : valeurs de Taylor et McLennan, 1985), des unités internes des granites fertiles de la province du Supérieur et du pluton de Separation Rapids, Ontario. Modifié de Breaks et Tindle, (2001).	24
Tableau 4.1. Summary table of petrographic properties of granites within the three facies. Estimated modal percentages are established from microscopic observations and colored sections.	57
Tableau 4.2. Summary of mineralogical characteristics of the four (4) principal families of LMB pegmatites. Abbreviations: Ab=albite, Kfs=K-feldspar.....	61
Tableau 4.3. Average composition of the three facies of LMB granites. Abbreviations: I1B-Bt = biotite granite, I1B-Bt-MS = Biotite-muscovite granite, I1B-Ms = muscovite granite. n = number of samples, s = Standard Deviation, x = Mean.	66
Tableau 4.4. Chemical characteristics of the four families of pegmatites from the LMB sector and Boily et al. (1989) samples.....	70
Tableau 4.5. Averages of measurements conducted on muscovites from selected samples. Abbreviations: Brl=beryl, Co Ta=colombo-tantalite, Spd=spodumene. (-) indicates absence of data.	76

Tableau 4.6. Averages of measurements conducted on potassium feldspar from selected samples for the four families of pegmatite. Abbreviations: Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene. (-) indicates absence of data.	78
Tableau 4.7. Summary of the averages of the K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf ratios of different families of pegmatites in the study area according to our data and those of Boily et al. (1989). Limits Spd: lower limits for spodumene pegmatites according to compilation by Legault (2023a). Abbreviations: Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene.	85
Tableau 4.8. Calculated ratios relative to the total number of analyses compiled for granites and pegmatites in the SIGEOM.	85

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1. Localisation du secteur d'étude par rapport aux cantons de Villemontel, Figuery, La Motte et Preissac sur un fond topographique. Contour du Batholite de La Motte provient du SIGEOM (2022). La limite du pluton est représentée en noir et celle des cantons en bleu.... 3
- Figure 2.1. Un diagramme illustrant la zonation régionale des pegmatites de la famille LCT (Černý, 1991b). Les lignes blanches en pointillés sont des surfaces isothermes. D'après London (2014a). 11
- Figure 2.2. Schéma représentatif d'un champ de pegmatites LCT montrant sa zonation régionale autour du granite source. Les pegmatites les plus enrichies tendent à être les plus éloignées du granite source. Modifié d'après Müller et al. (2017). 14
- Figure 2.3. Schéma d'une pegmatite à éléments rares zonée. (Jébrak et Marcoux, 2008) 17
- Figure 2.4. Évolution interne de la pegmatite de Tanco (d'après London 1986). 19
- Figure 2.5. Zonation régionale dans les granites et pegmatites fertiles (Černý, 1991b) 21
- Figure 2.6. Zonalité géochimique observée dans les pegmatites du Groupe du Lac Birse, district de Winnipeg River au Manitoba. Les chiffres indiquent la moyenne du rapport K/Rb des feldspaths potassiques (moyenne de 3 à 4 analyses) pour chacun des dykes de pegmatite. Les flèches indiquent la tendance de la différenciation géochimique exprimée par la diminution du rapport K/Rb. Modifié de Trueman et Cerny (1982). 26
- Figure 2.7. Diagramme Ta (ppm) vs K/Cs reflétant la composition géochimique des muscovites prélevés dans les pegmatites granitiques. Les concentrations en Ta augmentent lorsque le rapport K/Cs diminue. Les lignes horizontales indiquent une teneur de Ta minimale à partir de laquelle les muscovites se localisent dans le champ des pegmatites considérées économiques pour le Ta. Modifié de Moller et Morteani (1987). 28
- Figure 2.8. Carte géologique du pluton de La Motte présente la répartition géographique des sous-types des monzogranites. D'après Mulja et al. (1995a). 32

- Figure 2.9. Carte géologique de la zonation minéralogique des pegmatites granitiques minéralisées de la Suite plutonique de Preissac-La Corne de la Sous province de l'Abitibi. Le rectangle bleu correspond au secteur d'étude. Tirée de Boily et al. (1990). 34
- Figure 2.10. Carte illustrant la géologie et la localisation des indices dans le secteur du Batholite de La Motte ainsi que les affleurements décrits durant l'été 2022. Plusieurs des indices de béryl ne sont pas répertoriés dans les indices du SIGEOM, mais ont été identifiés sur les cartes de compilation du MRNF (1984). Géologie tirée du SIGEOM (2022). 35
- Figure 3.1. Détails techniques de la description des affleurements. a et b) Transport en hélicoptère pour les affleurements difficiles d'accès; c) Génération de géofiches (81) à l'aide d'une tablette électronique ; d et e) Prise d'échantillons à l'aide de la scie portative; f) Exemple d'échantillon de granite pris par marteau et burin..... 38
- Figure 3.2. Scie fixe pour préparation des échantillons pour les lames minces, les analyses chimiques et le test de coloration. 39
- Figure 3.3. Coloration au cobaltinitrite de sodium. a) Immersion de la plaque de roche dans de l'acide fluorhydrique (48%) pendant 30 secondes. b) Rinçage à l'eau du robinet. c) Trempage de la roche dans une solution saturée de cobaltinitrite de sodium mélangé à de l'eau du robinet (environ 60 g pour 100 ml) pendant 30 secondes à 1 minute. d) Séchage des roches. e) Prélèvement de petits morceaux de feldspath potassique comme témoin pour vérifier la coloration et la conservation des propriétés de la solution. f) Échantillons en cours de séchage sous la hotte. 40
- Figure 3.4. Photos montrant les étapes de l'analyse chromatique sur ImageJ des scans des roches (pegmatites) traitées au cobaltinitrite de sodium. a) Image RGB non filtrée d'un scan de pegmatite colorée à l'acide. b) Image RGB suite au ColorThreshold du scan de pegmatite. c) Image 8bit après ColorTreshold. d) Image 8bit après Treshold B&W, le tracé vert illustre le polygone à l'intérieur duquel la proportion de pixels blancs sera calculée en utilisant l'outil Analyze particles. 41
- Figure 3.5 Station de microscopie Zeiss Axio Imager pour l'observation des lames minces..... 42

- Figure 3.6. Microsonde électronique CAMECA SX-100 pour l'analyse minéralogique au département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. 43
- Figure 4.1. Geological map of the Quebec portion of the Abitibi Subprovince illustrating the location of the Preissac-La Corne Plutonic Suite (blue rectangle)..... 50
- Figure 4.2. Geology of the Preissac - La Corne Plutonic Suite area. The study area is delineated by the blue rectangle. U-Pb geochronological data: dark grey = monzogranite; light grey = pegmatite dyke; white = others. See text for details pegmatites geochronology. MTZ = Manneville Thrust Zone; PDDMZ = Porcupine-Destor-Manneville Deformation Zone. Modified from Pilote et al. (2018) with additional U-Pb geochronology by Machado et al. (1991), Ducharme et al. (1997) and Davis (2022, 2023). 51
- Figure 4.3. Structural map showing the trajectories of the main schistosity and stretching lineations of the La Motte Batholith and surrounding rocks. Adapted from Pilote et al. (2018). 52
- Figure 4.4. Compilation of dyke measurements with and without dip from this study on a rose diagram (A) and only those with dip on a stereonet (B). The modified Kamb pole concentration method was used..... 54
- Figure 4.5. Location of Be, Mo, Ta and Li showings/deposits in the La Motte Batholith area on the geological map adapted from SIGEOM (2022) and geological compilation maps (Ministry of Energy and Resources, 1984). 54
- Figure 4.6. Microphotographs of granites. a) Biotite granite showing chloritized biotites. Sample 2022-SR-1035A. b) Muscovite granite with fresh magmatic muscovites. Sample 2022-SR-1043B. c) Two-mica granite with the presence of zircon inclusions in the biotites. Sample 2022-SR-1051A. Abbreviations: Bt = Biotite, Chl+ = Chloritization, Kfs = Potassium Feldspar, Ms = Muscovite, Pl = Plagioclase, Qz = Quartz. Scalebar 200µm. 58
- Figure 4.7. Typical barren pegmatites within the LMB. a) Pegmatite in gradational contact with finer-grained granite. Outcrop 22-SR-1039. b) Pegmatitic dyke in sharp contact with finer-grained granite. Outcrop 23-SR-1021. 60
- Figure 4.8. Photos of pegmatite samples. Photos a, b, c, and e underwent potassium feldspar staining with sodium cobaltinitrite. Potassium feldspar in yellow, plagioclase in white/pink.

a) Barren pegmatite. Sample 22-SR-1017A. b) Beryl pegmatite. Sample 22-SR-1079A. c) Colombo-tantalite pegmatite. Sample 22-SR-1047A. d) A photo of a bluish-green beryl crystal. Sample 2022-SR-1013A. e) Spodumene pegmatite. Sample 22-SR-1073A. f) Outcrop of the Authier deposit showing green-hued spodumenes. Outcrop 22-SR-1030. Abbreviations: Ab = albite, Brl = beryl, Co Ta = colombo-tantalite, Grt = garnet, Ms = muscovite, Or = orthoclase, PR = perthite, Qz = quartz. 62

Figure 4.9. Photomicrographs of pegmatites. a) Barren pegmatite containing biotites. Sample 22-SR-1068A. b) Garnet grain in a barren pegmatite. Sample 22-SR-1062A. c) Microphotograph of colombo-tantalite pegmatite showing the fine granularity of these minerals. Sample 22-SR-1047A. d) Spodumene with a fresh crystalline texture. Sample 22-SR-1023A. Abbreviations: Ab = albite, Bt = biotite, Co Ta = colombo-tantalite, Grt = garnet, Ms = muscovite, Or = orthoclase, PR = perthite, Qz = quartz, Spd = spodumene. Scalebar 200 μ m. 63

Figure 4.10. Bivariate diagrams of major elements (Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{T})}$, K_2O , and Na_2O) relative to the SiO_2/CaO in the LMB. Abbreviations: Bt = biotite, I1B = late LMB phase, I1G = pegmatite, I2F = early LMB phase, Ms = muscovite. 67

Figure 4.11. Bivariate diagrams of trace element contents (Sr, Rb, Zr, Th, Nb, and Ta) relative to SiO_2/CaO ratio from the BLM. Abbreviations as in Figure 4.10. 68

Figure 4.12. Variation of oxide concentrations as a function of the SiO_2/CaO ratio for pegmatitic samples from the LMB. Abbreviations: Brl = beryl, CoTa = colombo-tantalite, I1B/I2F = LMB, I1G = pegmatite, Spd = spodumene. 71

Figure 4.13. Correlation between the SiO_2/CaO ratio and trace element contents for the pegmatitic families of the LMB. Abbreviations as in Figure 4.12. 72

Figure 4.14. Comparison of ratios of generally incompatible elements in LMB pegmatites. Spodumene pegmatites are the most distinctive with the lowest K/Rb and Mg/Li ratios, except for the intraplutonic dyke. Abbreviations: Brl = beryl, CoTa = colombo-tantalite, Spd = spodumene. 74

- Figure 4.15. Plot comparing the K/Rb ratio of muscovites (Ms) versus the K/Rb ratio of whole rock analyses from barren pegmatites to spodumene dykes. Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene. 77
- Figure 4.16. Plot of K/Rb ratios of potassium feldspars (Kfs) versus those of the whole rock in the four pegmatitic families. Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene. 79
- Figure 4.17. Graph of the average Ta/(Ta+Nb) ratio versus the average Mn/(Mn+Fe) ratio for colombo-tantalite analyses from this study. Data from Mulja et al. (1996) are presented for comparison. The arrows indicate the compositional change from early colombo-tantalite (dyke border) to late (dyke center) (Mulja et al., 1996). Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene. 80
- Figure 4.18. Graph displaying the concentration of Mg (ppm) as a function of the Mn/(Mn+Fe²⁺) ratio in garnets for barren pegmatites (Barren), beryl dykes (Brl), colombo-tantalite dykes (CoTa), and spodumene dykes (Spd). The diagram is inspired by Breaks et al. (2003). 81
- Figure 4.19. Potential map of pegmatites based on the K/Rb ratio using analyses from this study as well as those of Boily et al. (1989). The southeastern sector of the BLM exhibits dykes with low K/Rb ratios where no spodumene mineralization has been identified to date. Geology background from SIGEOM (2022). See figure 4 for geological legend. Green triangles indicate lithium mineralization. 87
- Figure 4.20. Potential map of felsic intrusions based on the K/Rb ratio from the compilation of SIGEOM data in this study. The northern and northeastern sectors of the LMB show the lowest values. Geology background from SIGEOM (2022). See figure 4 for geological legend. Green triangles indicate lithium mineralization. 88

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
°C	Degré Celsius
A/CNK	$[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$
ACTLAB	Activation Laboratories Ltd
Al	Aluminium
B	Bore
Ba	Baryum
Be	Béryllium
BLM	Batholite de La Motte
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
cm	centimètre
Cs	Césium
EDS	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy
E-O	Est-ouest
ESE	Est sud est
ÉTR	Éléments à terres rares
F	Fluor
Fe	Fer
Fe ₂ O ₃ (tot)	oxyde de fer (III) total
GPS	Global Positioning System
Hf	Hafnium
HFSE	Éléments à haute intensité de champ
I1B	Granite
I1G	pegmatite
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
INAA	Instrumental Neutron Activation Analysis
IRME	Institut de Recherche en Mines et Environnement
K	potassium

K/Rb	Rapport entre le potassium et le rubidium
Kbar	Kilobar
km	kilogramme
km²	kilomètre carré
LCT	Li-Cs-Ta \pm Be
Li	Lithium
Li/Cs	Ratio lithium par rapport au césium
Ltd	Limited
Ma	Million d'années
MCS	Minéraux Critiques et Stratégiques
Mg	Magnésium
MHT	Métaux de Haute Technologie
ml	millilitre
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Na	sodium
nA	nanoampères
Nb	Niobium
NYF	Nb-Y-F \pm ÉTR, U, Th, Zr, Ta, Pb
P	Pression
PAP	Pouchou et Pichoir
Pb	Plomb
ppm	partie(s) par million
Rb	Rubidium
REE	Éléments à terres rares
RVB	Rouge, Vert, Bleu
SIGÉOM	Système d'Information Géominière
Sn	Étain
SPPLC	Suite plutonique de Preissac-La Corne

Sr	Strontium
Ta	Tantale
TD-ICP	Thermal Desorption Inductively Coupled Plasma
Th	Thorium
Ti	Titane
U	Uranium
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale
UTM	Universal Transverse Mercator
V	Le nombre 5
XRF	X-ray Fluorescence in Energy Dispersive mode
Y	Yttrium
Zr	Zirconium
µm	micromètre

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE1. Tableau récapitulatif présentant les indices existants autour et dans le Batholite de la Motte avec leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques. (-) = absence d'informations; colonne affleurement = présence ou non d'affleurement. Indices en gris sont des indices non-métalliques dans le SIGEOM et donc ne contiennent pas de teneurs chimiques. 112
- ANNEXE2. Tableau descriptif de la composition minéralogique et le pourcentage modale des lames minces observées. Abréviations : Ms = muscovite, Ms (I et II) = muscovite primaire et secondaire..... 113
- ANNEXE3. Analyses de la microsonde montrant les analyses chimiques des minéraux. Échantillon : Affleurement 2022-SR-XXXX. Abréviation : Brl = Béryl, bord = bordure, rim = bordure ou marge, CoTa = colombo-tantalite, Grt = grenat; Kfs = feldspath potassique, Line = ligne, Ms = muscovite, na = non analysé, core = noyau, Spd = spodumène..... 115

Chapitre 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'économie mondiale est en pleine transformation et les nouvelles technologies accélèrent ce changement tout en transformant les modes de vie de l'homme. Les appareils et les équipements intelligents, l'aérospatiale, les télécommunications, les énergies renouvelables, le stockage d'énergie, le domaine médical et l'électrification des transports sont tous des secteurs en accroissement pour lesquels on note un approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques (MCS). Le Québec a pris en considération cet enjeu et a fait adopter un plan de valorisation des minéraux critiques et stratégiques pour les années 2020-2025 (PQVMCS, 2020). Ce plan expose des mesures concrètes pour tirer le plus d'avantages de l'utilisation des minéraux indispensables à la transition énergétique et technologique à l'échelle nationale et internationale. Le Plan se répartit en quatre orientations et ce projet de maîtrise s'introduit dans l'Orientation 1 « Accroître les connaissances et l'expertise sur les MCS » (PQVMCS, 2020).

Le secteur du Batholite de La Motte (BLM) est hôte de plusieurs minéralisations en lithium, tantale et béryl, dont le gisement Authier (101.9 Mt @ 1.06% Li₂O; Sayona Québec). Celles-ci sont exclusivement associées à des dykes de pegmatite LCT (Li-Cs-Ta) issus des dernières phases de cristallisation du BLM (Boily, 1992, 1995; Mulja et al., 1995a, b, 1996). Bien que le secteur ait été caractérisé et évalué de façon assez intensive par le passé (Norman, 1944; Dawson, 1966; Leduc, 1980; Boily et al., 1989, 1990; Boily, 1992, 1995; Mulja et al., 1995a, b, 1996), les zones hautement favorables à contenir des pegmatites LCT n'ont pas été ciblées. L'ajout de données (réanalyse, nouvelles analyses) et une caractérisation minéralogique permettront de réaliser des cartes de potentiel plus complètes.

Le présent projet de recherche vise à caractériser de manière approfondie les pegmatites de cette région. En s'appuyant sur une revue exhaustive de la littérature scientifique afférente, cette étude cherche à combler des lacunes spécifiques dans la compréhension des mécanismes de formation et de distribution de ces pegmatites à l'échelle du BLM. L'approche méthodologique adoptée combine des techniques avancées de cartographie géologique, d'échantillonnage sur le terrain, et d'analyses minéralogiques et géochimiques, visant à fournir une image complète et nuancée des caractéristiques géologiques, minéralogiques et géochimiques des pegmatites étudiées.

Les implications de cette recherche sont nombreuses et offrent des perspectives nouvelles pour l'exploration du lithium en Abitibi et au-delà. En fournissant des nouvelles données sur la géologie, la minéralogie, et la géochimie des pegmatites, ce travail est une contribution scientifique pour guider l'exploration et l'exploitation de roches lithinifères dans la région.

1.2 Localisation et accès

Le BLM se situe à environ 47 km à l'est de la ville de Rouyn-Noranda (à vol d'oiseau) dans la région administrative de l'Abitibi (08). Il est localisé dans la partie nord du feuillet 32D08, et s'étale sur quatre cantons : Villemontel, Figuery, La Motte et Preissac (Figure 1.1). Il forme une intrusion elliptique de 9,5 km de large sur 22 km de long, orientée est-ouest entre le village de Preissac et le lac La Motte. Le terrain est accessible et est atteignable en suivant la route 117 à partir de la ville de Rouyn-Noranda via la route 395 pour la partie ouest du pluton et la route 109 pour la partie est. Généralement, le secteur d'étude est caractérisé par un couvert végétal dense, principalement composé de forêt boréale. Les conditions d'accès aux affleurements sont assez difficiles en raison de cette densité végétale et du manque de chemins forestiers ou de pistes. Cependant, la présence de nouveaux affleurements des dykes de pegmatites et de leur encaissant dévoilés par la réalisation de nouvelles coupes forestières facilite la description géologique et la génération des géofiches.

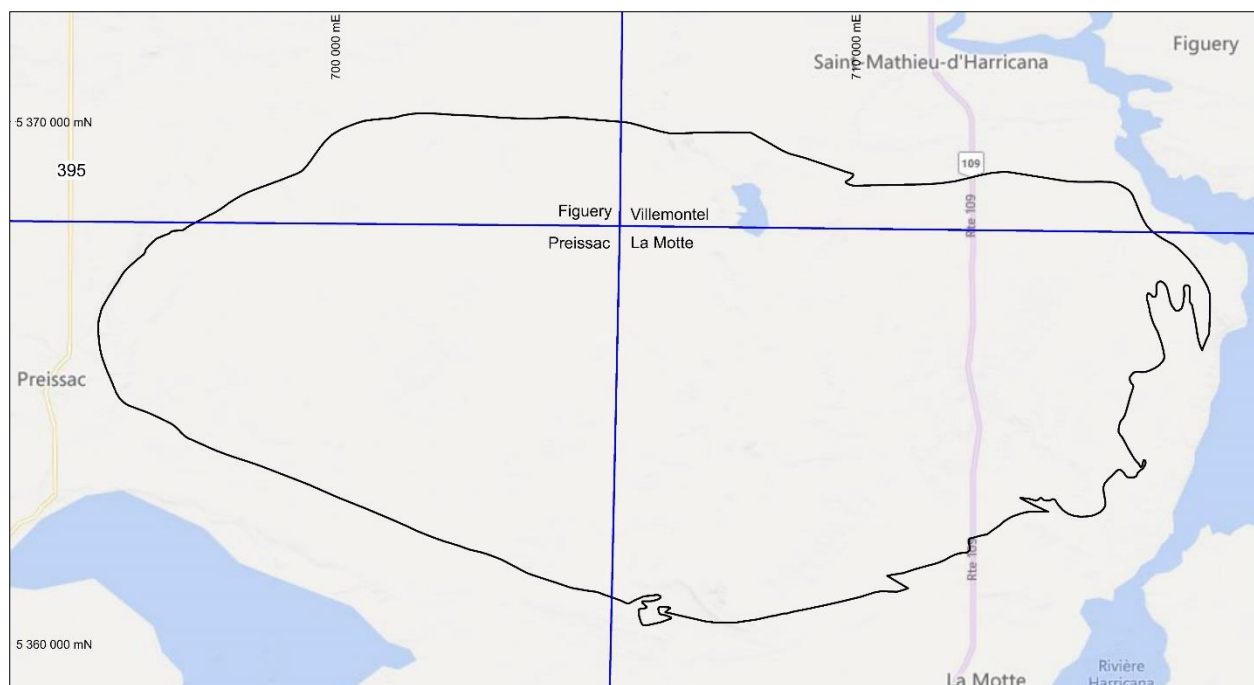


Figure 1.1. Localisation du secteur d'étude par rapport aux cantons de Villemontel, Figuery, La Motte et Preissac sur un fond topographique. Contour du Batholite de La Motte provient du SIGEOM (2022). La limite du pluton est représentée en noir et celle des cantons en bleu.

1.3 Problématique

Les pegmatites minéralisées en métaux rares comprennent des pegmatites riches en Li-Cs-Ta (LCT) et celles riches en Nb-Y-F \pm ÉTR, U, Th, Zr, Ta, Pb (NYF) (Černý et Ercit, 2005). Au Québec, les pegmatites LCT sont principalement à spodumène (pyroxène) et beaucoup moins à lépidolite (mica) et à 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, 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 et ils ne forment que très rarement des gisements exploitables en MCS (Linnen et al., 2012). Les pegmatites NYF ne sont pas connues dans le secteur du BLM et ne seront pas discutées.

Selon Černý et Ercit (2005), les pegmatites de type LCT se formeraient dans un contexte orogénique et sont issues de plutons parents péralumineux. Le mode de formation des pegmatites

est encore débattu à ce jour (Müller et al., 2017; Koopmans et al., 2023). Cependant, le modèle le plus communément accepté implique un liquide silicaté résiduel issu de la cristallisation fractionnée extrême d'un pluton granitique source (Černý, 1991a, b; London, 2018). 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, le taux de nucléation, la polymérisation et la viscosité du magma tout en augmentant la capacité de diffusion de celui-ci. Ces paramètres responsables de la texture caractéristique des pegmatites (Simmons et Webber, 2008) définissent un modèle pétrogénitique en accord avec 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 la distance par rapport au pluton parent. Généralement, les pegmatites stériles sont à la bordure et à l'intérieur du pluton tandis que les pegmatites riches en Li, F, P et autres éléments rares à caractère incompatible sont dans les zones les plus éloignées de la marge du pluton (Černý, 1991b; Breaks et al., 2005). Une zonation similaire a également été proposée pour la SPPLC (Suite plutonique de Preissac-La Corne) par Mulja et al. (1995b) et Boily (1995). Cette zonation chimique s'accompagne d'une zonation minéralogique, avec des pegmatites à deux micas dans le pluton et des pegmatites à spodumène, lépidolite, béryl et colombo-tantalite plus éloignées du pluton (Müller et al., 2017).

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 des pegmatites et ils sont robustes pour l'exploration du lithium (Cerny et al., 1985; Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019). Des valeurs limites de ces ratios sont compilés par Legault (2023) et permettent de distinguer les plutons parents fertiles et les dykes de pegmatite fertiles pour les minéralisations en lithium. Plusieurs compagnies d'exploration utilisent ces ratios pour définir des pegmatites fractionnées qui ont donc une potentialité plus élevée de découverte de spodumène. Cependant, une limite majeure au modèle de granite source est que les pegmatites lithinifères sont généralement plus jeunes que le granite auquel elles sont spatialement associées (p. ex. : Stiling et al., 2006). Ceci est également le cas du secteur du BLM où le dyke lithinifère du gisement Authier est plus jeune (2632 ± 5 Ma; Davis, 2023) que le BLM (2641 ± 2 à 2647 ± 2 Ma) et d'un dyke à béryl qui le recoupe (2639 ± 2 Ma; Machado et al., 1991; Ducharme et al., 1997).

Un modèle a récemment été proposé pour expliquer la présence de dykes lithinifères spatialement associés à des plutons peralumineux mais qui possèdent une différence d'âge considérable. Koopmans et al. (2023a) ont proposé un modèle anatectique à deux étapes pour expliquer cette relation. La fusion partielle d'un granite peralumineux qui est lui-même issu de la fusion partielle de roches sédimentaires permettrait ainsi la formation de pegmatite lithinifère d'âge asynchrone.

Il existe également un modèle de formation par fusion partielle limitée de roches sédimentaires pour expliquer les pegmatites lithinifères qui ne montrent pas de lien spatial avec un granite peralumineux à deux micas (Müller et al., 2017).

1.4 Objectifs

L'étude menée sur le Batholite de La Motte (BLM) poursuit deux objectifs centraux. Le premier consiste en la détermination des zones présentant un potentiel élevé pour la découverte de spodumène, par le biais d'une cartographie et d'une analyse détaillées des pegmatites et des granites. L'analyse vise à distinguer et cibler précisément les secteurs propices à la minéralisation en lithium. Le second objectif se concentre sur l'élucidation du lien génétique entre le BLM et les dykes lithinifères. Cet objectif englobe le développement d'une compréhension approfondie des caractéristiques géologiques, minéralogiques et géochimiques, indispensable pour délimiter les zones à haute valeur prospective. L'adoption de ces objectifs dans l'approche méthodologique permet d'élaborer une stratégie d'exploration, basées sur une synthèse des données recueillies et qui indique les zones les plus prometteuses identifiées au sein du BLM.

1.5 Structure du document

Ce mémoire de maîtrise est structuré en six chapitres. Initialement, une introduction offre un cadre pour le projet, la localisation du secteur d'étude ainsi que la problématique et les objectifs du projet. Le second chapitre présente une revue de littérature portant sur les thèmes traités dans cette recherche : un aperçu sur les pegmatites granitiques à éléments rares; et l'historique des principaux travaux géologiques dans la région d'étude. Le troisième chapitre élabore sur la méthodologie adoptée pour réaliser cette étude. Le chapitre quatre présente les résultats et discussions sous la

forme d'un article scientifique. Le cinquième chapitre présente une discussion sur l'ensemble du projet, tandis que le sixième et dernier chapitre présente une conclusion et les recommandations de poursuite du projet.

Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Les pegmatites lithinifères

Dans ce chapitre, nous entamerons une exploration approfondie des pegmatites lithinifères, qui sont essentielles pour comprendre les ressources minérales critiques telles que le lithium, le césium, et le tantale. Nous commencerons par une vue d'ensemble des pegmatites, analysant leur formation, caractéristiques et l'importance économique. Cette analyse sera suivie d'une discussion sur les critères d'évaluation du potentiel des régions riches en pegmatites LCT fractionnées, offrant un cadre pour identifier les zones à fort potentiel d'exploration. Ensuite, nous revisiterons les travaux géologiques significatifs réalisés dans la région d'étude, permettant de contextualiser les connaissances actuelles dans un cadre historique. En particulier, nous examinerons la zonation du Batholite de La Motte pour mieux comprendre sa structuration et son impact sur la localisation des pegmatites LCT. Cette revue de littérature vise à établir une base solide pour les études futures et à souligner les avancées dans la compréhension des pegmatites lithinifères.

2.1.1 Un aperçu sur les pegmatites

2.1.1.1 Historique du mot pegmatite

Le mot pegmatite a été employé pour la première fois par Brogniart (1813) pour décrire et définir une roche constituée de lamelles de quartz et de feldspath. Antérieurement, cette roche était considérée comme du granite à structure graphique.

Haidinger (1845) a été le premier auteur qui a utilisé le mot « pegmatite » pour décrire les granites à nombreux grains grossiers de feldspath. Delesse (1849) a également inclus dans « pegmatite » les roches formant des dykes à très gros grains d'orthose, de quartz et de muscovite. L'usage actuel du mot pegmatite suit également l'idée fondamentale de Delesse (1849). Dans ce mémoire le terme « dyke de pegmatite » indique une roche intrusive de composition granitique contenant une texture pegmatitique mais pouvant également contenir une granulométrie plus fine.

2.1.1.2 Les pegmatites granitiques à éléments rares

Les pegmatites à éléments rares sont des sources importantes de lithium, de béryllium, d'étain, de rubidium, de tungstène, de césium, de gallium, d'hafnium, de niobium et de tantale (Van Lichtervelde, 2006). Certaines pierres précieuses et semi-précieuses telles que la topaze, la tourmaline, le grenat et le béryl en sont également extraites, notamment les variétés d'émeraude et d'aigue-marine. On trouve des pegmatites à éléments rares partout dans le monde. Elles sont de différents âges divers allant de l'Archéen au Cénozoïque (Černý, 1989).

Toutefois, d'importantes pegmatites minéralisées en métaux rares sont dans les cratons archéens et paléo-protérozoïques. Elles sont généralement associées au métamorphisme régional allant du faciès des schistes verts supérieurs au faciès des amphibolites (Černý, 1989). Elles se présentent sous forme des dykes, à la fois verticales et horizontales, d'épaisseur centimétrique à métrique mais peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres.

La forme, la taille ou même les éléments mineurs associés aux pegmatites à éléments rares varient en fonction de la profondeur de mise en place et du niveau métamorphique de la roche encaissante (Černý, 1991a). Notamment, en profondeur, à haut degré de métamorphisme, ces pegmatites ont tendance à constituer des corps lenticulaires et ellipsoïdaux grâce à la forte ductilité de la roche hôte, tandis que près de la surface, ils forment des filons plutôt plats remplissant les fractures. Cependant, l'intensité de la minéralisation en éléments rares semblent être à son paroxysme aux faciès schistes verts supérieurs à amphibolite (Černý, 1991b) (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Principales subdivisions et caractéristiques des cinq classes de pegmatites granitiques.
Traduit de Černý et Ercit, 2005.

Classe-Sous classe	Éléments / minéraux typiques	Environnement métamorphique	Relation aux granites
Abyssale (AB)			
AB-HREE	Éléments de Terres Rares Lourds, Y, Nb, Zr, U, Ti	(amphibolite supérieure à haute P granulite faciès; ~4 à 9 Kbar, ~700 à 800°C)	aucune(ségrégations de granite anatectique leucosome ?)
AB-LREE	Éléments de Terres Rares Légers (ETRL), U, Th, Ti		
AB-U	U, Th, Zr, ETRL		
AB-BBe	B, Be		
Muscovite (MS)			
	Pas de minéralisation en éléments rares (micas et minéraux céramiques)	haute P, faciès amphibolite barrovien à haute P (kyanite-sillimanite), 5 à 8 Kbar, ~650 à 750°C)	aucune (corps anatectiques) à marginal et extérieur
Muscovite-Élément rares (MSREL)			
MSREL-RFE	Y, Éléments de Terres Rares (ETR), Ti, U, Th, Nb-Ta	modérée à haute P, T (faciès amphibolite; 3 à 7 Kbar, ~650 à 520°C)	intérieur à extérieur; localement mal défini
MSREL-Li	Li, Be, Nb		
Élément rares (REL)			
REL-REE	Be, Y, ETR, U, Th, Nb>Ta, F	variable, généralement peu profonde et postérieure aux événements régionaux affectant les roches encaissantes	intérieur à marginal (rarement extérieur)
REL-li	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Hf, Nb, Ta, B, P, F	amphibolite d'Abukuma à basse pression (andalousite-sillimanite) jusqu'au faciès des schistes verts supérieurs ; environ 2 à 4 Kbar, ~650 à 450°C	de l'intérieur à marginal jusqu'à extérieur
Miarolitiques (MI)			
MI-REL	Y, ETR, Ti, U, Th, Zr, Nb, F	très basse P, postérieur aux événements régionaux affectant les roches hôtes	intérieur à marginal
MI-Li	Li, Be, B, F, Ta>Nb	faciès d'amphibolite à schiste vert à basse P, de 3 à 1,5 Kbar, de 500 à 400°C	(de l'intérieur à) marginal à extérieur

2.1.1.3 Classification des pegmatites granitiques à éléments rares

La classification des pegmatites granitiques a fait l'objet d'une révision récente (Wise et al., 2022) qui propose une classification basée sur la composition minéralogique et la texture. Cette classification repose sur l'identification des minéraux caractéristiques de chaque type de pegmatite, ainsi que sur la reconnaissance ou l'absence de zones de transition texturales.

Cependant cette classification est peu utilisée jusqu'à présent et la classification universellement connue de Černý et Ercit (2005) est préférée ici. Cette classification, bien qu'elle diffère légèrement de la classification récente de Wise et al. (2022), a jeté des bases solides dans la compréhension des pegmatites granitiques, mettant en relief leur diversité et leur complexité. En effet, les pegmatites granitiques forment cinq (5) classes (Tableau 2.1), distinctes par leur environnement géologique, le lien avec le granite parent, leur composition minéralogique et géochimique, leur profondeur de mise en place et le degré du métamorphisme dans l'encaissant, et la valeur économique en termes de teneur en métaux rares (Černý et Ercit, 2005). Cette classification subdivise également les pegmatites minéralisées en éléments rares en deux familles géochimiques distinctes dont chacune possède des caractéristiques différentes : 1) la famille LCT qui traduit un enrichissement principal du magma pegmatitique en lithium (Li), césium (Cs) et tantale (Ta), et 2) la famille NYF qui traduit un enrichissement du magma en niobium (Nb), yttrium (Y), fluor (F) et éléments de terres rares (ÉTR). Une troisième famille montrant des caractéristiques communes aux pegmatites LCT et NYF a très rarement été identifiée. Suite à la compilation des indices du secteur du Batholite de La Motte (BLM) qui sera présentée plus loin, il appert que seulement des minéralisations de type LCT sont présentes et donc les pegmatites de type NYF ne seront pas développées dans ce mémoire.

2.1.1.4 Les pegmatites LCT

Les pegmatites LCT sont de composition peralumineuse et sont ainsi chimiquement similaires aux granites peralumineux auxquels elles sont généralement spatialement associées (Černý et Ercit, 2005). Ces granites sont interprétés comme s'étant mis en place dans un contexte orogénique.

Pour les pegmatites LCT, Černý (1991a, c) distingue quatre (4) types principaux: le type à béryl (avec les sous-types à béryl-colombite et à béryl-colombite-phosphate); le type complexe (avec les sous-types à spodumène, à pétalite, à lépidolite et à amblygonite); le type à albite-spodumène et le type à albite. Les caractéristiques principales des différents types sont regroupées dans le tableau 2.2 et la figure 2.1.

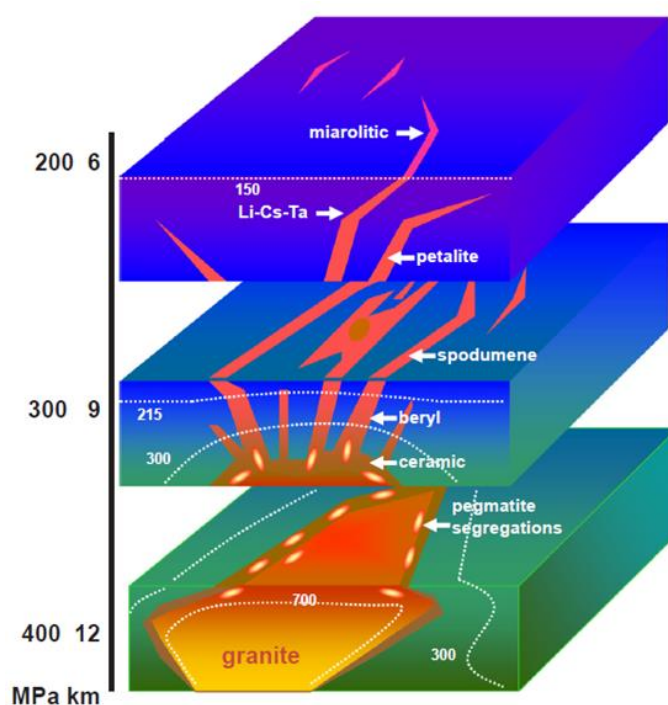


Figure 2.1. Un diagramme illustrant la zonation régionale des pegmatites de la famille LCT (Černý, 1991b). Les lignes blanches en pointillés sont des surfaces isothermes. D'après London (2014a).

Tableau 2.2. Classification des pegmatites granitiques à éléments rares : sous-classe à lithium. Traduit de Černý (1991a, c).

Type	Sous-type Signature géochimique	Minéraux typiques	Potentiel économique
Béryl	<i>Béryl-colombite</i> Be, Nb<Ta	Béryl, colombite-tantalite	Be, (Nb et Ta en faible quantité)
	<i>Béryl-colombite-phosphate</i> Be, Nb<Ta, P	Béryl, colombite-tantalite, Triplite, triphylite	
Complexe	<i>Spodumène</i> Li, Rb, Cs, Be, Ta<Nb	Spodumène, béryl, tantalite, (amblygonite, lépidolite, pollucite)	Li, Rb, Cs, Be
	<i>Pétalite</i> Li, Rb, Cs, Be, Ta>Nb	Pétalite, béryl, tantalite, (amblygonite, lépidolites, pollucite)	Ta (Sn, Ga et Hf en faible quantité)
	<i>Lépidolite</i> F, Li, Rb, Cs, Be, Ta>Nb	Lépidolite, topaze, béryl, microlite, (pollucite en faible quantité)	Li, Rb, Cs, Ta, Be (Sn et Ga en faible quantité)
	<i>Amblygonite</i> P, F, Li, Rb, Cs, Be, Ta>Nb	Amblygonite, béryl, tantalite, (lépidolites, pollucite en faible quantité)	Li, Rb, Cs, Ta, Be (Sn et Ga en faible quantité)
Albite-Spodumène	Li	Spodumène, (cassitérite, béryl et tantalite en faible quantité)	Li, Sn (Be et Ta en faible quantité)
Albite	Ta<Nb, Be	Tantalite, béryl, (cassitérite en faible quantité)	Ta, (Sn en faible quantité)

2.1.1.5 Origine et modèles génétiques des pegmatites LCT

Le processus de formation des pegmatites de type LCT demeure controversé. L'un des concepts les plus anciens concernant la formation des pegmatites est que leurs textures particulières et leurs zonations internes sont dues à la cristallisation rapide du magma dans des conditions loin de l'équilibre (London, 2008). Il est désormais reconnu que les pegmatites cristallisent de la bordure vers le centre par température progressivement décroissante à pression variable, dans des conditions d'échange avec la roche hôte, à partir d'un magma granitique très hydraté riche en volatils et, à des degrés divers, en éléments lithophiles rares (London, 2008).

Ce processus peut être subdivisé en deux phases principales distinctes : 1) la genèse d'un magma pegmatitique et 2) l'acquisition et l'enrichissement en éléments rares pendant la consolidation de leur structure interne. Ainsi, deux modèles génétiques sont confrontés et abordés pour justifier la genèse des pegmatites granitiques à éléments rares de type LCT (Figure 2.2).

2.1.1.5.1 Le modèle du granite parent et la zonation régionale

La plupart des auteurs sont en accord sur un modèle où le faciès pegmatitique riche en LCT se forme à partir d'un liquide silicaté résiduel issu de la cristallisation fractionnée extrême d'un pluton granitique (Gourcerol et al., 2019).

Le modèle le plus courant fut proposé à l'origine par Cameron et al. (1949), re-étudié par Jahns et Burnham (1969), Černý (1991a, b) et récemment défendu par London (2018). Ce modèle implique la consolidation d'un granite, le plus souvent peralumineux à deux micas d'où fuiraient, depuis sa partie sommitale de la chambre magmatique, des magmas pegmatitiques résiduels enrichis en éléments volatils et incompatibles. Selon le modèle présenté par London (2018), plus les magmas pegmatitiques sont éloignés de leur source granitique parentale, plus ils sont riches en éléments rares et volatils (Li, Nb, Ta, F, B, H₂O). Ce modèle est fondé sur des preuves physico-chimiques (répertoriées dans Černý et al., 2005) telles qu'une continuité géochimique des suites granito-pegmatitiques, une composition granitique des magmas pegmatitiques à éléments rares et une zonation régionale observable autour de certains plutons granitiques. Le modèle insiste sur la zonation spatiale des pegmatites autour d'un pluton parent qui est encore considéré comme le pilier

de ce modèle. Les pegmatites LCT se localisent régionalement dans des enveloppes plus ou moins concentriques autour du granite parent. Ces enveloppes sont définies d'après la paragenèse des minéraux et le degré d'enrichissement des métaux rares. De ce fait, les pegmatites stériles sont au contact et à l'intérieur du pluton, et les pegmatites riches en Li, Cs, Ta et autres éléments rares à caractère incompatible sont réparties dans les zones les plus distales (Černý, 1991) (Figure 2.2).

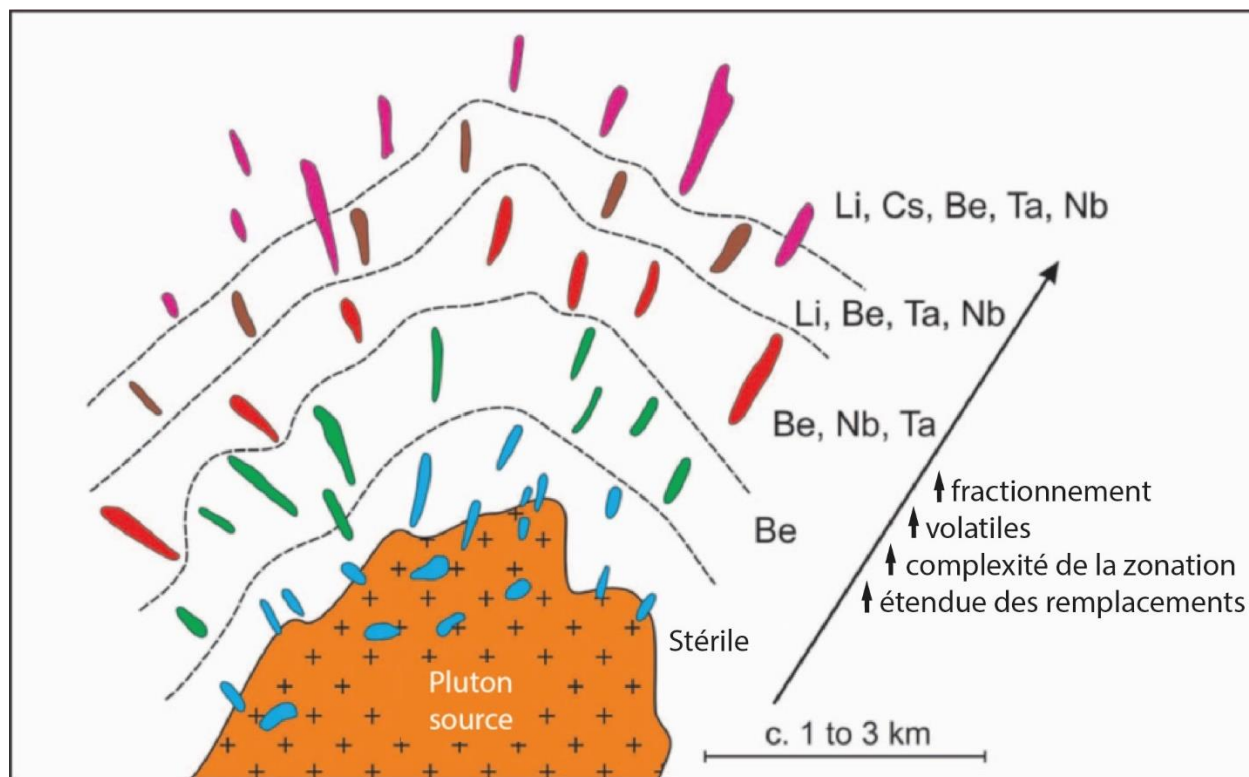


Figure 2.2. Schéma représentatif d'un champ de pegmatites LCT montrant sa zonation régionale autour du granite source. Les pegmatites les plus enrichies tendent à être les plus éloignées du granite source. Modifié d'après Müller et al. (2017).

Les plus importantes études sur ce modèle sont les études géochimiques par Černý (1992), Černý et al. (1995) et Martins et al. (2012). L'argument principal pour démontrer les relations génétiques entre ces granites et les pegmatites de type LCT était la continuité du fractionnement magmatique appuyé par les variations minéralogique, des diagrammes de Harker et des ratios tels que K/Rb, K/Cs, Mg/Li, Zr/Hf et Nb/Ta (Breaks et al., 1992, 2005; Selway et al., 2005).

2.1.1.5.2 Le modèle d'anatexie crustale partielle

Selon Černý et al., (2005), le modèle d'anatexie crustale partielle est un modèle alternatif au modèle du granite parent. Norton (1973), Zasedatelev (1974) et Stewart (1978) sont les premiers auteurs fondateurs de ce modèle. La formation des pegmatites à éléments rares par anatexie crustale a été évoquée pour illustrer le phénomène de rassemblement de certains types de pegmatites et démontrer la large étendue des champs de pegmatites comparée à celle des plutons granitiques.

Récemment, ce modèle a été réutilisé pour la démontrer la mise en place des champs de pegmatites LCT en l'absence de granite parent. Ce modèle permet d'expliquer les différences chronologiques existantes entre les granites et les pegmatites (Melleton et al., 2012, Muller et al., 2017, 2023) ainsi que la discontinuité du fractionnement magmatique entre les granites et les pegmatites les plus évolués (Martins et al., 2012).

Selon Simmons et Webber (2008), la mise en place des plutons granitiques en contexte orogénique pourrait favoriser un faible taux de fusion partielle autour du pluton. Les roches métasédimentaires riches en évaporites constituent une source idéale d'éléments incompatibles et volatils. Ceci engendre la remobilisation des éléments dans les plutons granitiques dans un contexte tectonique collisionnel et se présenteront également dans des volumes de magma beaucoup plus faibles. Ainsi, ce mécanisme d'anatexie directe serait à l'origine de pegmatites minéralisées en éléments rares. Malgré ces études, le modèle d'anatexie directe reste très controversé.

Actuellement, ces deux modèles sont admissibles, le premier étant plus approprié pour démontrer la présence de pegmatites à éléments rares à proximité de pluton granitique, dans des zones dénuées de grandes structures tectoniques, tandis que le dernier est plutôt cité pour expliquer la présence des pegmatites dans des milieux dépourvus de granitoïdes.

2.1.1.6 Le processus d'enrichissement en éléments rares : la cristallisation fractionnée

Le concept traditionnellement accepté pour expliquer la formation des pegmatites par la cristallisation rapide d'un magma granitique initialement en déséquilibre, en système fermé, progressant de la bordure vers le centre du dyke. Ce processus est graduellement influencé par la baisse de la température. Le magma, riche en éléments rares lithophiles et en composants volatils tels que Li, Be, B, P, F, et H₂O, contribue à réduire la température de solidification du granite, à diminuer la viscosité du magma, à limiter le taux de nucléation et à favoriser une croissance cristalline accrue (London, 2008, 2018).

Les études expérimentales faites par Jahns et Burnham (1969) développent bien le phénomène d'apparition des textures pegmatitiques traduite par l'exsolution du quartz dans les feldspaths alcalins et les micas par la séparation d'une phase aqueuse au stade ultime de la consolidation du magma pegmatitique. Ainsi, ce modèle suggère que le magma source des pegmatitiques, contrairement aux magmas granitiques peralumineux, est initialement saturé en H₂O. Les complexes fondants (Li, B, F) favorisent la miscibilité de l'eau dans le magma, jusqu'à la dernière étape de consolidation des pegmatites. La préservation de ces eaux permettrait la concentration d'éléments rares au cœur des pegmatites et la diffusion de ces magmas dans la croûte. Plus la concentration en H₂O dissoute est élevée, plus la viscosité des magmas est faible et plus la propagation du magma pegmatitique à partir de son granite parent est efficace (London, 2018).

2.1.1.7 Constitution interne des pegmatites LCT

2.1.1.7.1 Zonation interne des pegmatites

Les pegmatites à éléments rares sont marquées par des structures internes complexes très hétérogènes (Černý, 1991a); le seul type à structure relativement homogène est le type albite-spodumène (Tableau 2.2). Une zonation concentrique est considérée comme la structure la plus commune, avec un nombre de zones pouvant aller jusqu'à neuf. En effet, les zones diffèrent par leur texture et leur minéralogie. Selon Wise et al. (2022), les pegmatites à éléments rares zonées

sont composées de plusieurs zones distinctes, qui varient en fonction de leur emplacement vis-à-vis du mur et des conditions de leur formation. Ces zones sont généralement constituées d'une bordure, d'une zone intermédiaire, d'une zone de transition et d'un cœur de pegmatite. Ce cœur est très caractéristique et présente du quartz massif avec des minéraux à éléments rares. Chaque zone peut contenir des minéraux différents et présenter des caractéristiques physico-chimiques particulières (Figure 2.3).

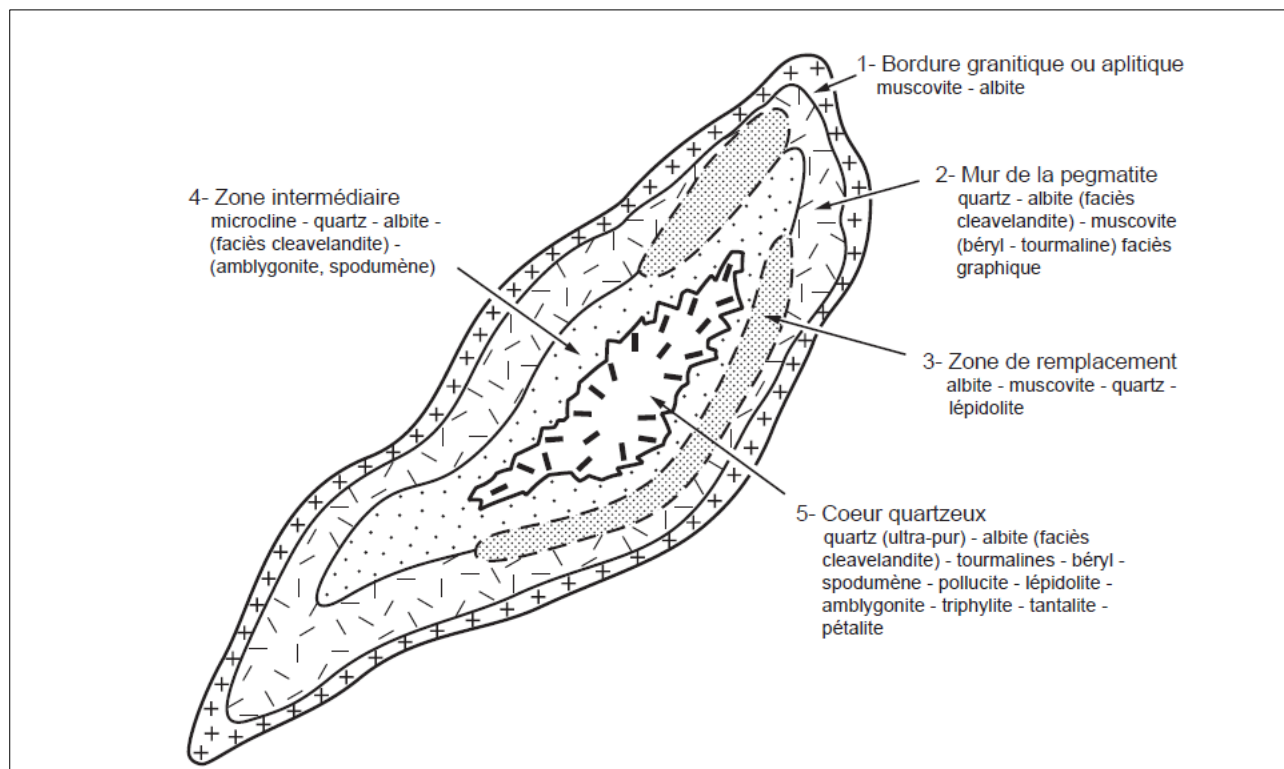


Figure 2.3. Schéma d'une pegmatite à éléments rares zonée. (Jébrak et Marcoux, 2008)

En bordure des corps pegmatitiques, des échanges géochimiques avec la roche hôte peuvent se produire (Errandonea-Martin et al., 2022). Les altérations de la roche encaissante (feldspathisation, séricitisation, etc.) peuvent être accompagnées par un élargissement extensif avec des grandeurs centimétriques à métriques, qui semblent dépendre de la roche hôte (Jébrak et Marcoux, 2008). Cette organisation minéralogique peut avoir été perturbée également par des mouvements syntectoniques de cisaillement lors du remplissage et des remplacements métasomatiques tardifs, notamment l'albitisation des feldspaths potassiques. D'autres minéraux peuvent également se

former ou être modifiés en réponse à ces mouvements comme la formation d'holmquistite ($\text{Li}_2 \text{Mg}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$) (Barros et al., 2022).

La différenciation de l'extérieur vers le centre d'un dyke se caractérise par des variations de teneur en éléments rares (Nb, Ta, Cs, Rb, Th, Zr, U) et des variations de certains minéraux typomorphes comme la tourmaline noire, verte et rose (variété schorl à elbaite), le béryl jaune, incolore et rose (variété héliodore, goshénite et morganite) (Seydoux, 1983).

2.1.1.7.2 Altération

L'assemblage minéralogique de base des pegmatites à éléments rares est simple: feldspath potassique, plagioclase de type albite, quartz et muscovite. Les pegmatites les plus primitives ne contiennent pas d'autres espèces minérales, alors que les plus évoluées abritent plus d'une centaine d'espèces minérales différentes dépendant de l'abondance en éléments volatils et alcalins rares (Li, F, B, P, Rb, Cs, etc....). De ce fait, les minéraux typiques des pegmatites autres que ceux précédemment cités sont la tourmaline, le béryl, le grenat, les phosphates et les oxydes de Nb- Ta, Ti, Sn, etc... Un spectre complet de la minéralogie des pegmatites est donné dans Černý (1989).

L'altération métasomatique des minéraux primaires (silicates, phosphates et oxydes) conduit à une myriade de phases secondaires et de paragenèses plus ou moins complexes. La caractérisation et la discrimination des minéraux primaires (cristallisés directement à partir d'un magma ou d'une phase fluide aqueuse) des assemblages secondaires n'est pas toujours évidente. Une des séquences de remplacement isochimique importante dans les pegmatites est la séquence d'aluminosilicate de lithium (pétalite-spodumène-eucryptite) (Figure 2.4), qui conduit à la décomposition de la pétalite en spodumène+quartz. Une association métasomatique courante dans les pegmatites à éléments rares est le mica + quartz remplaçant le microcline, en raison de fluides pegmatitiques tardifs légèrement acides (London, 1990). Étant donné que les pegmatites d'éléments rares cristallisent en système fermé, la cristallisation des phases hybrides est limitée aux zones les plus externes en raison de la contamination du magma pegmatitique par la roche hôte. On peut alors trouver des minéraux riches en Mg, Fe, Al ou Ti (tourmaline type schorl radiale, London 1990).

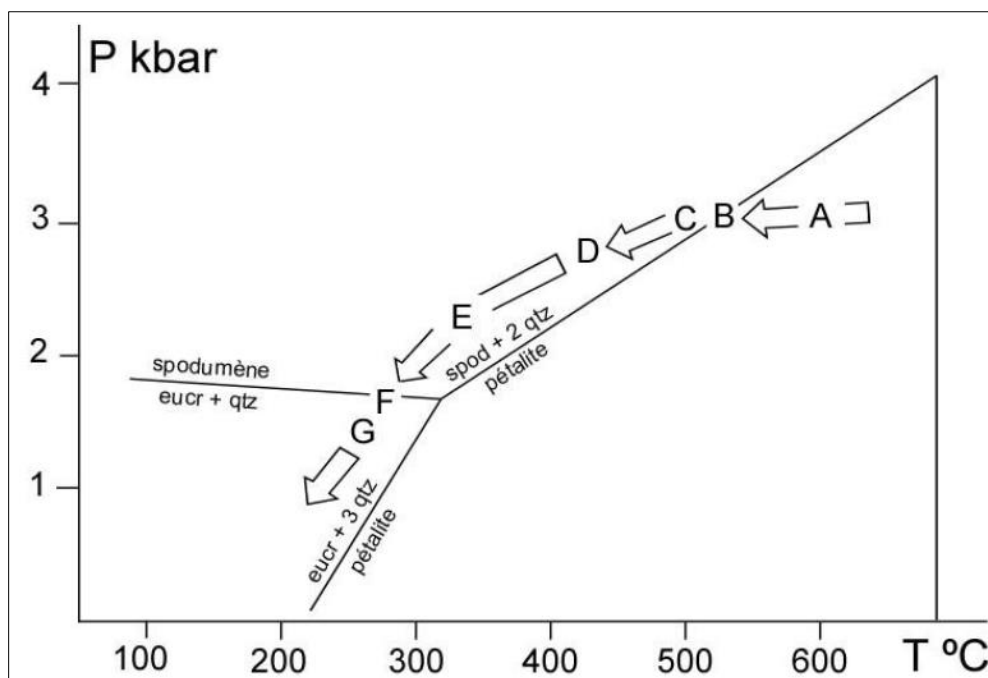


Figure 2.4. Évolution interne de la pegmatite de Tanco (d'après London 1986).

2.1.2 Critères d'évaluation d'une région pour le potentiel des pegmatites LCT les plus fractionnées

Les lignes directrices pour la prospection, l'exploration des pegmatites LCT ou l'évaluation de leur potentiel de minéralisation dans une région sont discutées dans les études et les revues de Trueman et Černý (1982), Selway et al. (2005), Galeschuk et Vanstone (2005, 2007), Breaks et al. (2005) et Steiner (2019b). Les auteurs ont observé que ces plutons présentaient une zonation verticale, avec des concentrations plus élevées en éléments rares dans les parties inférieures résultant du processus de cristallisation fractionnée lors de la formation du pluton. Ils ont également identifié des pegmatites associées à ces plutons, contenant des concentrations élevées en éléments rares et d'autres minéraux stratégiques. Dans cette section, les principaux critères d'estimation des zones favorables à contenir des pegmatites riches en MCS seront présentés, tout en traitant l'exemple du secteur du BLM.

2.1.2.1 Zonation régionale dans les granites fertiles et les dykes de pegmatite

Les systèmes granite-pegmatite sont largement confinés aux failles profondes à l'échelle régionale, aux contacts batholitiques préexistants ou aux limites lithologiques (Černý, 1989b). Ils sont généralement présents le long des limites des sous-provinces de la Province du Supérieur (exemple aux limites des sous-provinces d'English River et Winnipeg River; Breaks et al., 2005). Dans les terrains archéens, les ceintures de roches vertes, les fosses gneissiques métasédimentaires et les bassins métavolcaniques/métasédimentaires sont les principales unités dominantes abritant des pegmatites à éléments rares (Černý, 1989a).

Les régions généralement favorables contiennent à la fois des granites ou des leucogranites peralumineux fertiles, et des roches métasédimentaires ou métavolcaniques mafiques métamorphosées en faciès des schistes verts supérieurs à amphibolite inférieur (Černý, 1989b). Ces granites fertiles qui génèrent des pegmatites à éléments rares sont en grande partie tardifs ou postectoniques, datant du pic de métamorphisme régional (Černý, 1989b). L'identification des parents granitiques représente une étape initiale clé dans l'évaluation d'une région pour le potentiel des pegmatites LCT (Selway et al., 2005). Avec un fractionnement croissant, la composition du granite fertile passe du granite à biotite, dans les parties les plus profondes, à la leucogranite à deux micas, à la leucogranite muscovite à gros grains et à la leucogranite pegmatitique avec des couches intercalées d'aplite sodique et de pegmatite potassique au toit de l'intrusion (Figure 2.5a) (Černý, 1989a, 1991b). Cette séquence entière est rarement exposée dans une seule intrusion, car le nombre de types de roches exposés à la surface dépend du niveau d'érosion. Les dykes de pegmatite dans la roche hôte se trouvent au-dessus ou sur les flancs de l'intrusion de granite fertile.

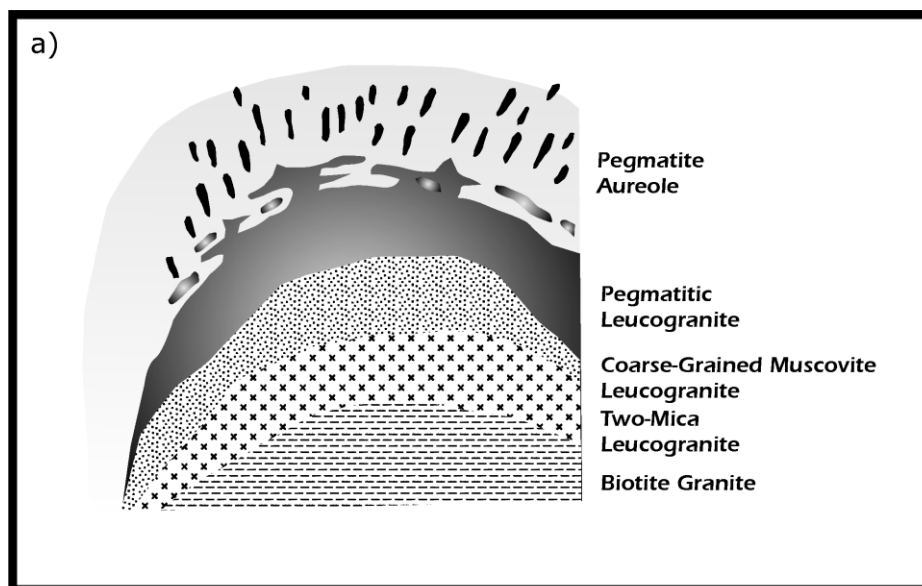


Figure 2.5. Zonation régionale dans les granites et pegmatites fertiles (Černý, 1991b)

Le degré de fractionnement, l'enrichissement en substances volatiles et le développement des zonations au sein de chaque dyke de pegmatite ainsi que l'ampleur de l'altération (par exemple, l'albitisation du feldspath potassique) augmentent en s'éloignant de plus en plus de leur granite fertile parent (Figure 2.2) (Černý, 1991b). La teneur en éléments rares des dykes de pegmatite augmente avec l'augmentation du fractionnement, car les éléments rares sont incompatibles avec les minéraux formateurs de roches et attendent le dernier moment pour cristalliser (Figure 2.2). Plus on s'éloigne du granite fertile parental, plus les pegmatites contiennent les minéraux index suivants :

1. béryl
2. béryl et ferrocolumbite
3. béryl, tantalite et aluminosilicates riches en Li- (comme la pétalite ou le spodumène)
4. béryl, manganotantalite, aluminosilicates riches en lithium et pollucite.

En théorie et selon le modèle, les dykes de pegmatite présentant le plus grand potentiel économique pourraient se trouver jusqu'à 10 km du granite parent (Selway et al., 2005).

2.1.2.2 Géochimie de la roche totale pour les granites et les pegmatites

Selon Breaks et al. (2003), la géochimie de la roche totale est utile pour distinguer les granites fertiles des granites stériles ainsi que les pegmatites les plus fractionnées. En effet, l'utilisation de la teneur en éléments majeurs et traces, à l'aide de diagrammes de Harker par exemples, représente une méthode très pratique et efficace pour évaluer la tendance et le degré de fractionnement d'échantillons des granites et des pegmatites.

Un des indicateurs de base pour établir la fertilité d'un granite et des pegmatites associées est sa peraluminosité. Le rapport moléculaire A/CNK [$\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] est utilisé pour indiquer si un échantillon est légèrement peralumineux ($A/CNK =$ de 1 à 1,1) ou fortement peralumineux ($A/CNK > 1,1$). Plus le rapport A/CNK est élevé, plus la teneur en aluminium est importante vis-à-vis les éléments alcalins et on retrouve ainsi des minéraux tels que le grenat (almandine et spessartine $A/CNK =$ infini), la muscovite ($A/CNK=3$) et béryl/spodumène ($A/CNK=\text{infini}$). Les granites stériles ont un faible rapport A/CNK ($<1,1$), les granites fertiles auront un rapport A/CNK modéré ($>1,1$) alors que les pegmatites à éléments rares auront un rapport A/CNK très élevé (>2).

La teneur en éléments rares dans une analyse d'un granite et surtout d'une pegmatite fertile peut être utilisée pour déterminer le degré de fractionnement de l'échantillon. Plus la teneur en éléments rares d'une analyse est élevée, plus le degré de fractionnement et le potentiel économique de la pegmatite sont élevés. Parmi les indicateurs clés, on trouve des concentrations élevées de Be, Cs, Li, Rb, Sn et Ta. (Selway et al, 2005). Les échantillons les plus fractionnés auront des valeurs élevées de certains ou de tous ces éléments. Le tableau 2.3, tiré des travaux de Taylor et McLennan (1985), Černý et Meintzer (1988) ainsi que Breaks et Tindle (2001) rapportent des exemples de valeurs moyennes pour des granites fertiles dans la Province du Supérieur en Ontario. Trueman et Černý (1982) ont noté que les granites évolués ont une faible teneur en Ti, Fe, Mg et Ca. Ainsi, ces caractéristiques géochimiques soulignent le degré poussé de différenciation magmatique atteint par les granites fertiles et les distinguent nettement des granites stériles (Breaks et al., 2003).

Les ratios élémentaires peuvent également être utilisés pour déterminer le degré de fractionnement et évaluer le potentiel économique des échantillons choisis. Les ratios suivants sont d'excellents indicateurs de fractionnement : K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf (Tableau 2.3 et 4). Les rapports

K/Rb et K/Cs évaluent la substitution K-Rb et K-Cs dans les feldspaths et micas potassiques. Le rapport Nb/Ta évalue la substitution Nb-Ta dans les minéraux oxydés et les micas. Les pegmatites ayant le plus grand potentiel économique auront des rapports K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf très bas. Ceci va mettre en évidence des secteurs clés pour l'exploration des pegmatites LCT (Steiner,2018).

Tableau 2.3. Valeurs limites des plutons sources (monzogranite) 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 (2023a).

Ratio	Monzogranite fertile	Dyke de 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

Tableau 2.4. Comparaison de l'abondance moyenne d'éléments rares et ratios sélectionnés dans: la croûte continentale supérieure : valeurs de Taylor et McLennan, 1985), des unités internes des granites fertiles de la province du Supérieur et du pluton de Separation Rapids, Ontario. Modifié de Breaks et Tindle, (2001).

Élément	Crouete continentale supérieure Moyenne (ppm)	Unités internes de granite pegmatitique						Pluton de Separation Rapids
		Leucogranite à grain fin		Granite pegmatitique		Aplite sodique		
		Moyenne (ppm)	Fourchette des éléments rares (ppm)	Moyenne (ppm)	Fourchette des éléments rares (ppm)	Moyenne (ppm)	Fourchette des éléments rares (ppm)	Maximum (ppm)
Be	3	4	<0,5-61	27	<0,5-604	6	1-34	24
Cs	3,7	8	<0,5-39	14	<0,5-51	16	<0,2- 67	272
Ga	17	38	<10-81	20	<10-90	9	45-73	94
Li	20	81	1-1400	51,7	6-288	82	7-324	1630
Nb	25	24	<1.81	18	<1-135	-	45-138	120
Rb	112	305	33-1050	473	32-5780	169	9-559	2310
Sn	5,5	9	<1-44	19	<1-112	13	2-25	652
Ta	2,2	4,5	2-8,5	2,7	0,5-8	-	3-435	68
K/Cs	7630	11000	794-78 400	7880	246-38 500	3020	166-14 900	35-1526
K/Rb	252	159	42-418	165	13-576	85	24-332	0,5-61
Nb/Ta	11,4	5	0,1-11,9	1,71	0,1-7,17	-	0,32-0,62	0,82-8,4

2.1.2.3 Utilisation des compositions minérales comme outil d'exploration : les feldspaths potassiques et les micas blancs (muscovites)

Lors de la cristallisation et du fractionnement du magma granitique, les minéraux s'enrichissent en éléments rares (par exemple, Li, B, Be, Rb, Cs, Nb, Ta, Mn, F) qui sont des éléments incompatibles. Par exemple, le feldspath potassique et la muscovite s'enrichissent en Rb et en Cs; le grenat s'enrichit en Mn ; et l'apatite s'enrichit en F (Cerny et al., 1985). L'augmentation du fractionnement entraîne également la cristallisation de minéraux contenant du Be, B, Li, Ta et Cs, par exemple le béryl (Be), la tourmaline (B) et les minéraux riches en lithium principalement le spodumène, la pétalite, la lépidolite et l'amblygonite. Černý et al. (1985) et Moller et Morteani (1987) ont développé une approche qui repose sur l'utilisation des variations de certains rapports élémentaires ou simples concentrations des éléments rares contenus dans les minéraux pour déterminer le degré de différenciation magmatique des pegmatites. Cette méthode permet ainsi d'identifier le potentiel économique des pegmatites. Les faibles rapports de K/Rb et, K/Cs dans les feldspaths potassiques et les faibles rapports K/Rb, K/Cs et Mg/Li ainsi que les concentrations élevées en Li et en Ta dans la muscovite indiquent des pegmatites hautement différenciées (Boily, 1992). Une description des principales caractéristiques géochimiques des feldspaths potassiques et des muscovites est présentée ci-dessous.

2.1.2.3.1 Le feldspath potassique

L'analyse ciblée du feldspath potassique est un excellent outil d'exploration car ce minéral est présent à la fois dans les granites fertiles et dans les pegmatites à éléments rares (Černý et al. 1981; Černý, 1989a ; Morteani et Gaupp, 1989). Les quatre (4) éléments clés dans l'analyse du feldspath potassique sont K, Na, Rb et Cs. Des teneurs élevées en Na indiquent une contamination par l'albite ou une mauvaise identification du feldspath potassique. Des teneurs élevées en Rb et Cs indiquent que le feldspath provient d'une pegmatite fortement fractionnée. La teneur en Rb des feldspaths potassiques de granites fertiles est généralement >1000 ppm, alors que pour ceux dans les pegmatites à éléments rares la teneur en Rb est généralement >10 000 ppm (Breaks et al, 2003). Le rapport K/Rb est utilisé pour évaluer le degré de fractionnement d'une pegmatite. Une étude du zonage géochimique dans l'enveloppe pegmatique du groupe du lac Birse situé dans le district de

la rivière Winnipeg au Manitoba (Figure 2.6) a été basée sur l'utilisation de ce rapport. Le nombre attaché à chaque pegmatite indique une moyenne du rapport K/Rb des feldspaths potassiques. Les flèches montrent la tendance de la différenciation géochimique au sein des pegmatites marquée par une diminution du rapport K/Rb, et peuvent nous indiquer les pegmatites qui sont plus différenciées et donc les plus susceptibles d'être minéralisées en Li, Cs et Rb (Boily, 1992). Par conséquent, les pegmatites présentant le plus haut degré de fractionnement (et donc le plus grand potentiel économique) contiennent des cristaux blancs de feldspath potassique avec $>10\,000$ ppm de Rb et K/Rb généralement inférieur à 100, ce qui est considéré comme très faible. Cette valeur est issue de plusieurs études sur des pegmatites riches en lithium et en béryllium, notamment celles menées par Cerny et al. (1985), London et al. (1998) et Cerny et Ercit (2005).

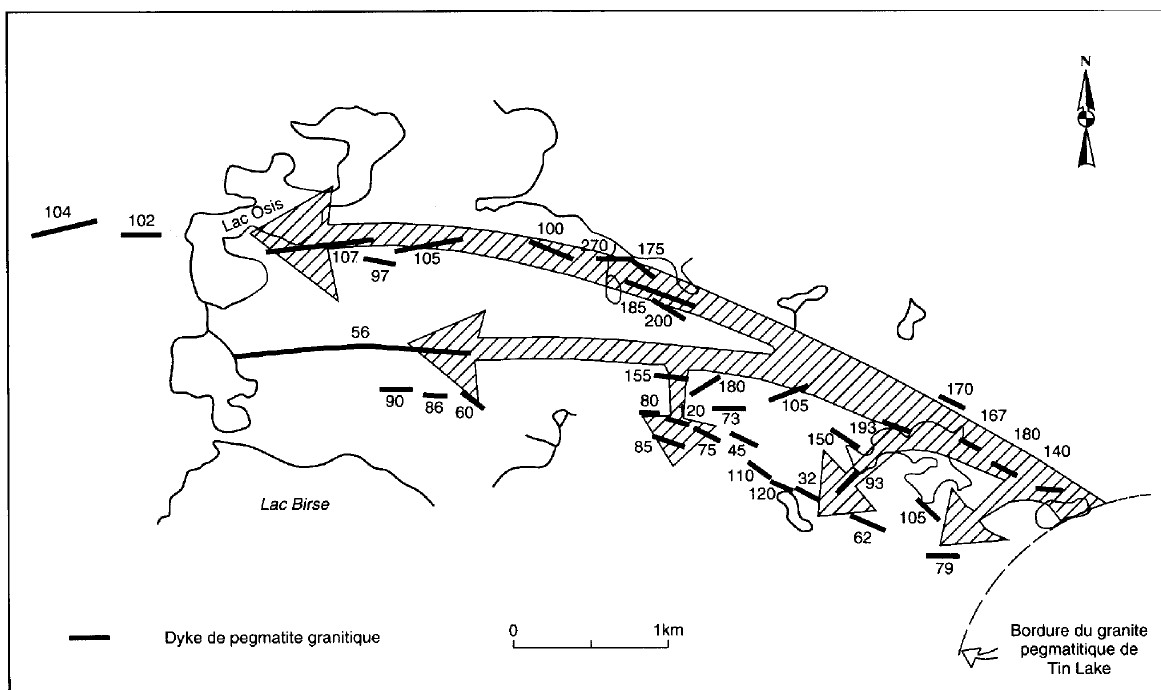


Figure 2.6. Zonalité géochimique observée dans les pegmatites du Groupe du Lac Birse, district de Winnipeg River au Manitoba. Les chiffres indiquent la moyenne du rapport K/Rb des feldspaths potassiques (moyenne de 3 à 4 analyses) pour chacun des dykes de pegmatite. Les flèches indiquent la tendance de la différenciation géochimique exprimée par la diminution du rapport K/Rb. Modifié de Trueman et Cerny (1982).

2.1.2.3.2 La muscovite

La couleur et la granulométrie de la muscovite changent avec l'augmentation du fractionnement. La muscovite des pegmatites stériles tend à être argentée et à grain moyen, tandis que la muscovite des pegmatites fertiles tend à être verdâtre et grossière (>2 cm) et même être identifiée comme muscovite lithinifère (Maneta, 2019). Avec le fractionnement croissant, la composition du mica passera de la muscovite lithinifère verte à la lépidolite violette. Dans les pegmatites fortement fractionnées, la muscovite verte peut avoir également de fines bordures de lépidolite (Breaks et al., 2003). L'analyse ciblée des muscovites est également un excellent outil d'exploration pour les pegmatites à éléments rares surtout une minéralisation de tantale (Gordiyenko, 1971 ; Černý, 1989a; Morteani et Gaupp, 1989). Les cinq (5) éléments clés dans l'analyse de la muscovite sont Li, K, Rb, Cs et Ta. Les pegmatites ayant le plus fort potentiel économique contiennent des valeurs de Li > 1000 ppm, Rb > 10 000 ppm, Cs > 50 ppm et Ta > 65 ppm (Breaks et al, 2003). Le diagramme du Ta versus K/Cs tiré de Moller et Morteani (1987) (Figure 2.7) est un excellent outil d'exploration. Ce diagramme, réalisé à partir d'analyses effectuées sur des muscovites permet de déterminer les pegmatites les plus aptes à receler des minéralisations de Li et/ou Ta, soit avec des faibles ratios de K/Cs et de hautes teneurs en Ta. Il est à noter que la plupart des analyses de muscovite du gisement Tanco, un producteur de tantale au Manitoba, ont de 100 à 1000 ppm de Ta.

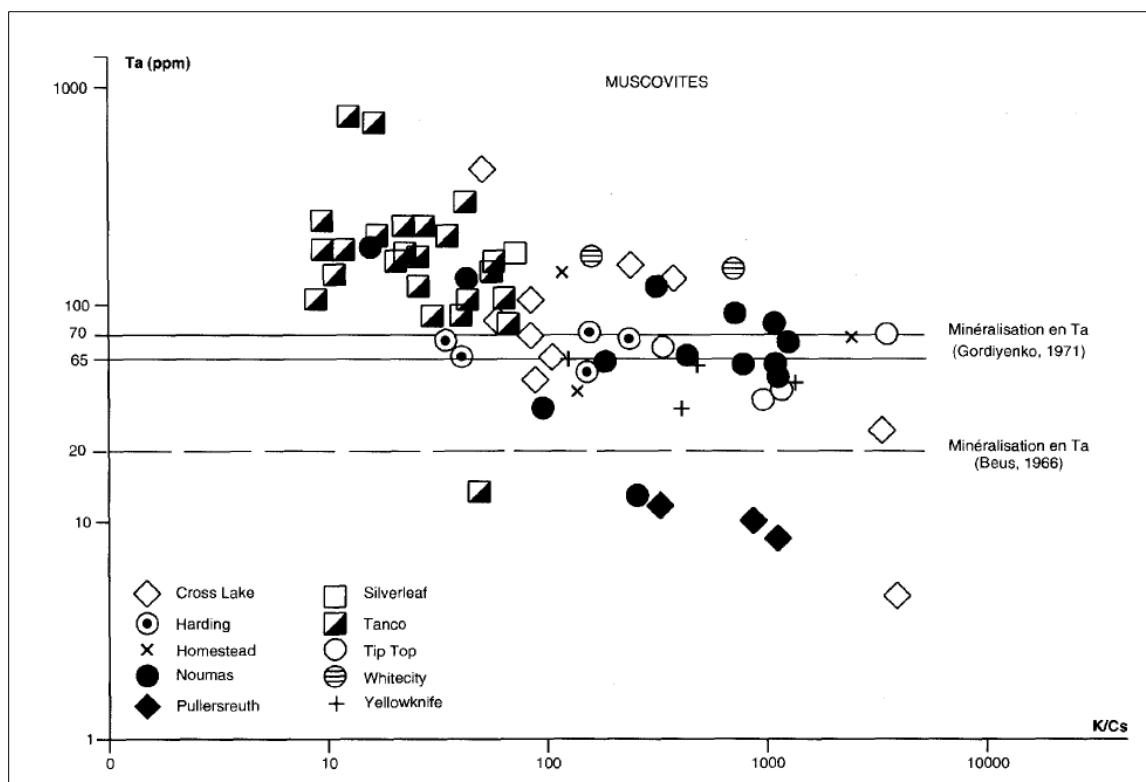


Figure 2.7. Diagramme Ta (ppm) vs K/Cs reflétant la composition géochimique des muscovites prélevés dans les pegmatites granitiques. Les concentrations en Ta augmentent lorsque le rapport K/Cs diminue. Les lignes horizontales indiquent une teneur de Ta minimale à partir de laquelle les muscovites se localisent dans le champ des pegmatites considérées économiques pour le Ta. Modifié de Moller et Morteani (1987).

2.2 Historique des principaux travaux géologiques dans la région d'étude

La zone d'étude choisie pour ce projet se situe dans le sud de la Sous-province de l'Abitibi et comprend le Batholite de La Motte. Ce batholite fait partie de la Suite plutonique de Preissac-La Corne et occupe la partie nord-ouest de cette suite (MRNF, 2022). Il s'agit d'un complexe géologique formé à l'Archéen (2681 à 2643 Ma). Le terme "Batholite de La Motte" (BLM) a été attribuée par Dawson (1966) qui a d'ailleurs rassemblé les différents batholites individuels de Preissac, La Motte et La Corne sous une dénomination commune, le "Batholite de Preissac-La Corne ». Toutefois, en raison des différences géochimiques et des âges variés de ces différents batholites, il a été proposé par Pilote (2018) de les regrouper sous le terme plus large de "Suite plutonique de Preissac-La Corne" (SPPLC). Cette révision dans la terminologie permet de tenir compte des distinctions importantes entre ces différents batholites tout en les rassemblant dans une même unité géologique.

La région d'étude a fait l'objet de nombreuses études géologiques, métallogéniques, pétrologiques et géochimiques. Ces études visaient à comprendre la composition et la formation des roches présentes dans la région, ainsi que les processus métallogéniques liés à la formation de gisements minéraux. Les études géochimiques ont également permis d'analyser la composition chimique des roches et d'identifier d'éventuelles signatures géochimiques associées à des processus géologiques spécifiques. En effet, au cours des soixante-quinze dernières années, de nombreuses recherches et études ont été menées sur le BLM ainsi que les formations rocheuses environnantes. Entre 1873 et 1945, plusieurs travaux de cartographie géologique ont été réalisés dans la région du nord-ouest du Québec, mettant en évidence la présence de roches granitiques. Une étude géologique initiale réalisée par McOuat (1873) a confirmé cette présence. Cependant, leurs apports aux connaissances sur le terrain se sont avérés limités. Les premiers travaux de cartographie ont été entrepris par Bancroft et al. (1912), qui ont dressé une carte générale de la région de La Motte à l'échelle 1/253 000 (1 pouce représente 4 miles). Cette carte a été suivie d'une cartographie plus détaillée réalisée par Wilson (1913) dans la région du lac Kewagama, révélant une répartition similaire des roches granitiques. Ces premiers rapports et cartes ont jeté les bases de la cartographie géologique ultérieure et ont contribué à la compréhension de la distribution des roches granitiques dans le canton de La Motte. Cooke et al. (1931) ont par la suite réalisé une avancée significative en publiant

une carte géologique couvrant l'ensemble du BLM, marquant ainsi une étape importante dans la compréhension de la région. Malgré des recherches ultérieures, peu de modifications ont été apportées à la cartographie des contacts batholitiques, ce qui témoigne de la fiabilité des données initiales. Par la suite, Norman (1944) a publié des rapports géologiques détaillés accompagnés de cartes à une échelle plus précise de 1/31 680 (2 pouces correspondant à 1 mile). Ces publications ont permis une exploration approfondie du BLM, fournissant des informations précieuses sur sa composition, ses caractéristiques géologiques et la présence de minéraux exotiques (béryl, colombo-tantalite et spodumène). Les travaux de Dawson (1954, 1966) sont considérés comme les premières études complètes et approfondies consacrées spécifiquement au SPPLC. Elles ont représenté une avancée majeure, fournissant un ensemble solide de données géologiques qui ont considérablement amélioré notre compréhension de ce batholite. Les travaux de Dawson ont fourni des informations détaillées sur la structure, la genèse et les propriétés géologiques du BLM.

Plusieurs campagnes de cartographie ont été menées pour étudier en détail les cantons de Figueray, La Motte, Preissac et Villemontel. Ces travaux ont permis d'acquérir une connaissance détaillée de la région et de ses formations géologiques dont le BLM. Leuner (1959) a produit une carte précise de la moitié ouest du canton de La Motte à une échelle de 1/12 000, tandis que Dugas et Hogg (1960) en faisait de même pour la partie NE du canton de Preissac, Sharpe (1961) pour la partie sud du canton de Figueray et Ciesielski (1978) pour le canton de Villemontel. Une autre contribution importante a été celle de Brett et al. (1976), qui ont présenté une carte à une échelle de 1/24 000 couvrant l'ensemble du canton de La Motte. Leduc (1980) a procédé à l'échantillonnage systématique du BLM et du Batholite de Preissac ainsi que sa caractérisation géochimique. Les travaux subséquents menés par Imreh (1984, 1991) ont inclus une révision cartographique à une échelle de 1/15 840, couvrant une superficie d'environ 3000 km² de terrains volcaniques. L'objectif principal de ces travaux était de décrire une lithostratigraphie précise, d'étudier la structure et de comprendre l'évolution volcanologique du sillon de La Motte-Vassan et de son avant-pays méridional. La compilation géologique du Lac de Montigny exécutée par Pilote (2016) à l'échelle 1/20 000 représente la dernière mise à jour de la carte du feuillet 32D08 dans le SIGÉOM.

La découverte de la molybdénite par Johnston (1902) dans le lac de Preissac a marqué le début d'un intérêt croissant pour ce minéral ainsi que d'autres métaux rares (Be, Li, Ta, Nb) dans la région. Cette découverte a suscité une série d'études approfondies axées sur ces métaux rares et

leur lien avec la SPPLM (et le BLM dans certains cas) et les pegmatites associées. Norman (1944) a été le premier à répertorier tous les indices de terres rares associés au BLM et le premier à répertorier les indices de molybdène de la SPPLC (Norman, 1945). Ces recherches ont permis d'illustrer l'importance des ressources minérales présentes dans cette région. Par la suite Rowe (1952) a réalisé une étude sur la pétrologie des pegmatites contenant du niobium, du tantale, du béryl et du spodumène. Dans les mêmes années plusieurs travaux sur les minéralisations de terres rares, tels que ceux de Hawley (1931), Derry (1950), Tremblay (1950), Siroonian et al. (1959) et Mulligan (1968), ont fourni des informations essentielles sur la description de ces indices. Ces études ont jeté les bases des recherches géologiques les plus récentes menées par des chercheurs tels que Boily et al. (1989, 1990), Boily (1992, 1995) et Mulja et al. (1995a, 1995b). qui visaient la caractérisation pétrologique, géochimique et économique de la SPPLC, en mettant l'emphasis sur le lien génétique entre ces minéralisations et le magmatisme associé à cette suite. Ces études ont contribué à une meilleure compréhension de la métallogénie de la région.

Les études de Boily (1992, 1995) et Mulja et al. (1995a, 1995b) ont fourni également une analyse plus détaillée et approfondie des différents faciès de la SPPLC. Ces études ont également démontré la relation co-magmatique des monzogranites et des pegmatites minéralisées ainsi que l'évolution des pegmatites, passant des variétés riches en béryl aux variétés riches en spodumène. Cependant, il est important de souligner que les recherches sur le BLM et ses dykes associés dans ces études antérieures sont limitées en raison d'un échantillonnage minimal et géographiquement restreint. Plusieurs études géochronologiques ont été menées par Machado et al. (1991), Feng et Kerrich (1992), Ducharme et al. (1997) et Davis (2020, 2023) dans le but de dater la SPPLC et les pegmatites associées. D'après Machado et al. (1991) la phase granitique du BLM aurait un âge U-Pb sur monazite de 2641 ± 2 Ma. Ducharme et al. (1997) quant à eux ont déterminé un âge U/Pb sur monazite de 2647 ± 2 Ma. Ces derniers ont également daté une pegmatite à béryl recoupant le BLM à un âge U/Pb sur monazite de 2639 ± 2 Ma. Une autre datation réalisée récemment par Davis (2023) sur le dyke à spodumène du gisement d'Authier, au sud du BLM. Les résultats de cette étude ont donné un âge U/Pb sur monazite de 2632 ± 5 Ma montrant ainsi que les pegmatites à spodumène sont plus jeunes que le BLM.

2.2.1 Zonation à l'échelle du Batholite de La Motte

Dans le secteur, Boily (1995) et Mulja et al. (1995), en se basant sur les relations géologiques entre celui-ci et les pegmatites granitiques combinées aux déductions minéralogiques et géochimiques, ont mis en évidence la relation cogénétique entre les monzogranites de la Suite Plutonique de Preissac – La Corne (SPPLC) et les pegmatites. Boily (1995) et Mulja et al. (1995b), ont utilisé le modèle de fractionnement de Rayleigh (McCarthy et Hasty, 1976; Tindle et Pearce, 1981) pour démontrer que le magma source de la SPPLC a subi une forte différenciation allant d'un monzogranite à biotite jusqu'aux pegmatites riches en éléments rares. En fait, le passage graduel du monzogranite à biotite au monzogranite à muscovite aurait résulté de la cristallisation continue des plagioclases jusqu'à la formation d'un magma résiduel à l'origine des pegmatites enrichies en Be, Li, Nb et Ta.

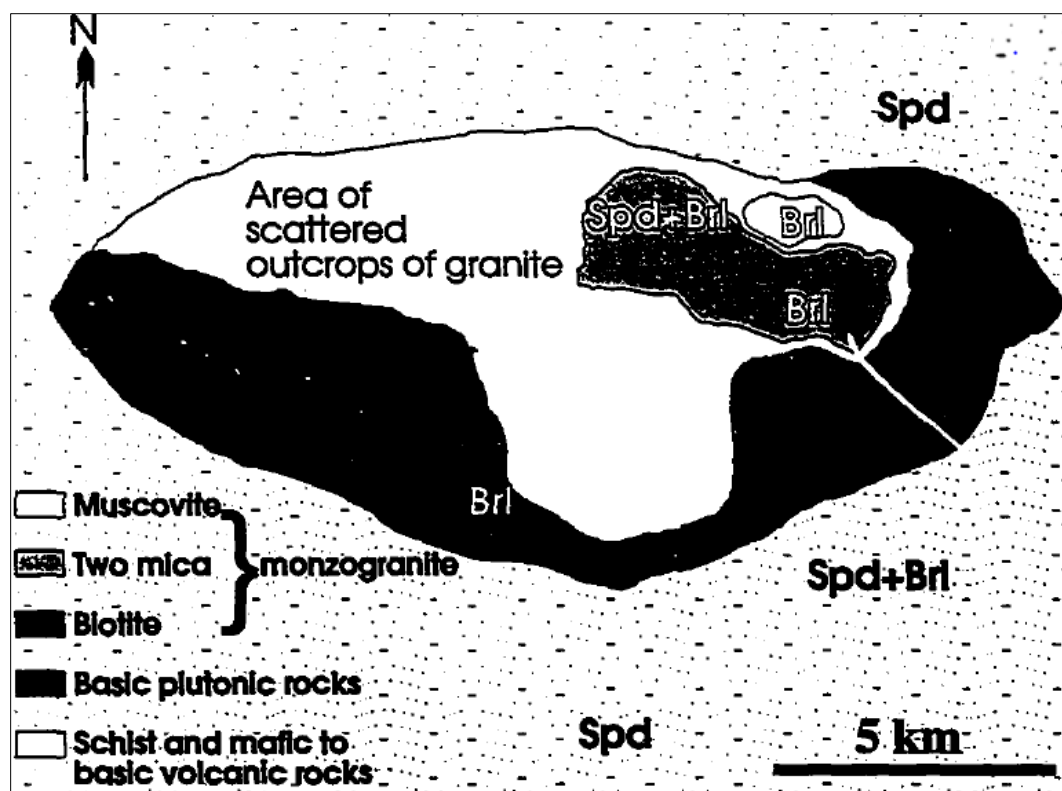


Figure 2.8. Carte géologique du pluton de La Motte présente la répartition géographique des sous-types des monzogranites. D'après Mulja et al. (1995a).

2.2.1.1 Les gites autour et dans le Batholite de La Motte

Les travaux de Boily (1992), ont porté sur l'identification d'une forte concentration de certains métaux de haute technologie (MHT) tels que le Li, Be, Ta, Cs, Rb et Mo avec des teneurs économiques considérables, associées aux pegmatites granitiques de la SPPLC dont le BLM fait partie (Figure 2.9). Une zonalité spatiale et minéralogique des dykes de pegmatites granitiques et des albitites autour de la SPPLC ont été définies par Boily et Gosselin (2004).

Les principales familles sont :

- Les pegmatites stériles à biotite + magnétite ;
- Les pegmatites à béryl \pm Ta \pm Li, affleurant en marge des batholites;
- Les pegmatites à albite + spodumène \pm Ta \pm Be \pm Mo, affleurant dans les roches encaissantes;
- Les dykes d'albitite riches en molybdénite et en colombo-tantalite \pm spodumène se trouvant hors de l'enveloppe contenant les dykes à albite +spodumène ;
- Les pegmatites à quartz + feldspath potassique + muscovite \pm albite avec molybdénite et dans des veine de quartz minéralisées en Mo \pm Bi \pm Be.

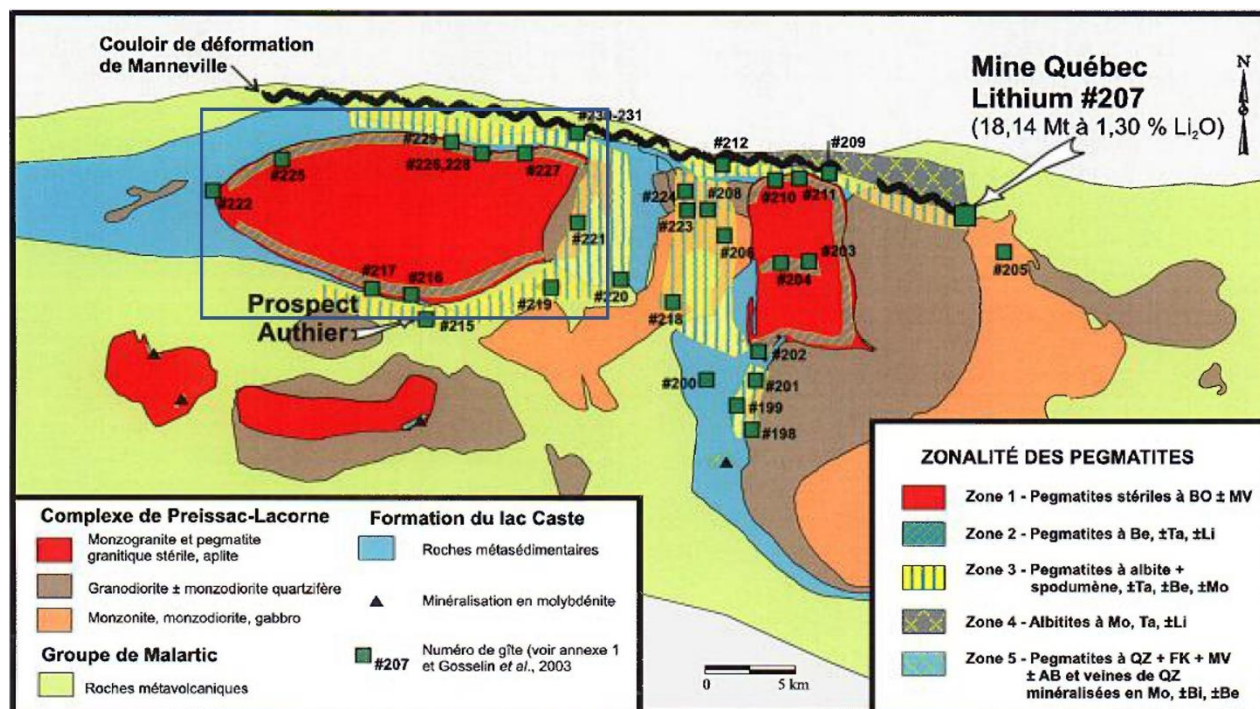


Figure 2.9. Carte géologique de la zonation minéralogique des pegmatites granitiques minéralisées de la Suite plutonique de Preissac-La Corne de la Sous province de l'Abitibi. Le rectangle bleu correspond au secteur d'étude. Tirée de Boily et al. (1990).

Une compilation des différents indices répertoriés dans le SIGÉOM est présentée dans l'annexe 1 et à la figure 2.10. La plupart des corps pegmatitiques sont représentés par des dykes orientés E-O, parallèles au contact du BLM et présentant un pendage variable. Leur largeur varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, tandis que leur longueur est variable et peut atteindre l'ordre du kilomètre. Ces dykes présentent une minéralisation constituée principalement de béryl, spodumène, molybdène et de colobotantalite. Cette observation est conforme à ce qui est rapporté par Boily (1992). Les dykes minéralisés en lithium sont principalement du spodumène sous forme de cristaux grossiers associés à un cœur de quartz. Ces dykes sont principalement situés aux bordures est, nord-est et sud du batholite (figure 2.10). Les dykes de molybdène se localisent plutôt dans la bordure ouest avec une minéralisation en molybdénite, quartz, muscovite et grenat.

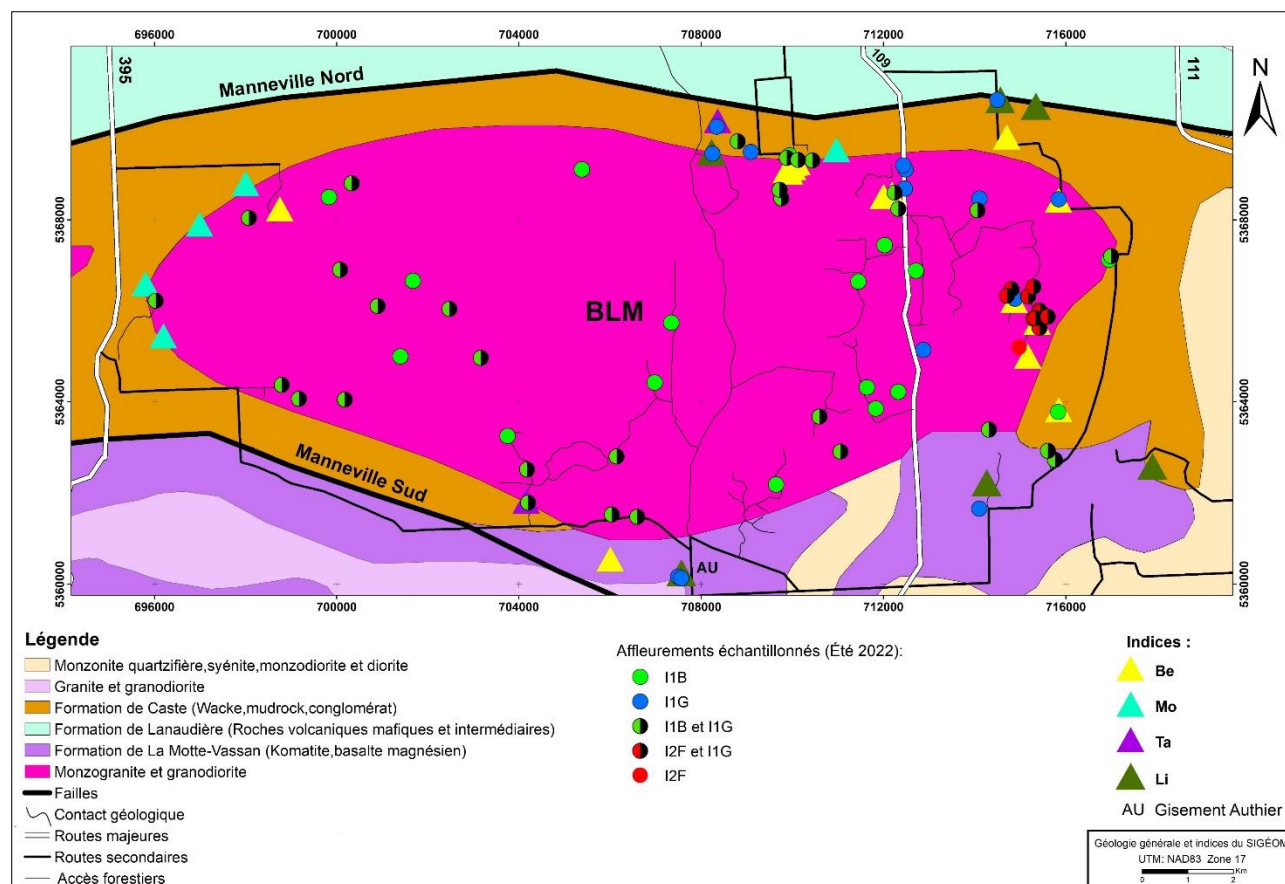


Figure 2.10. Carte illustrant la géologie et la localisation des indices dans le secteur du Batholite de La Motte ainsi que les affleurements décrits durant l'été 2022. Plusieurs des indices de béryl ne sont pas répertoriés dans les indices du SIGEOM, mais ont été identifiés sur les cartes de compilation du MRNF (1984). Géologie tirée du SIGEOM (2022).

Chapitre 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Compilation des données

Avant les travaux de terrain, une compilation des données géochimiques historiques du secteur d'étude a été effectuée. Cette tâche impliquait la collecte et la vérification des données existantes afin d'organiser de façon stratégique la campagne d'échantillonnage. Des documents, tels que des thèses, des mémoires, des articles scientifiques et des rapports géologiques, ont été analysés et les données géochimiques ont été contrôlées pour leur exactitude et localisation via la plateforme ArcMap d'ArcGIS et le levé LIDAR disponible sur le site Forêt Ouverte (www.foretouverte.gouv.qc.ca). Un contrôle de qualité a été réalisé en vérifiant aléatoirement des échantillons, leurs localisations et les valeurs des analyses chimiques surtout lorsqu'il y avait plus d'une analyse sur un même affleurement pour s'assurer de leur exactitude. La compilation des données collectées s'est faite dans une base de données Excel.

Une phase de planification pour la campagne d'échantillonnage visait à identifier les secteurs d'intérêt et problématiques. À la suite de l'analyse des données existantes et vectorielles du SIGÉOM, plusieurs déficiences ont été identifiées, particulièrement l'absence d'analyses chimiques dans plusieurs secteurs du BLM, la mauvaise géolocalisation de certaines analyses et le manque de données minéralogiques sur les dykes de pegmatite. Une campagne de terrain a été planifiée pour résoudre ces problèmes, en utilisant un GPS pour localiser précisément les affleurements.

3.2 Campagne de cartographie et échantillonnage

Une campagne de cartographie et d'échantillonnage s'est déroulée durant l'été 2022 pendant deux mois (juin - juillet). L'objectif principal visé par cette campagne était la caractérisation du Batholite de La Motte (BLM) ainsi que les dykes de pegmatite associés. Les indices connus ont été visités en priorité. Les affleurements visités et échantillonnés ont été choisis pour couvrir de manière homogène le secteur d'étude en fonction de leurs accessibilités. Cette prospection s'est faite le long des routes identifiées au préalable à partir des documents disponibles (cartes géologiques, images satellitaires). Les nouveaux chemins et accès forestiers dans les parties nord-est, est et sud du secteur d'étude ont facilité l'accès à plusieurs aires d'affleurements (Figure 2.10). Lors des visites

sur le terrain, des tranchées existantes anciennes et récentes ont également été explorées et échantillonnées. Parce que près de 60% du terrain est couvert par des marécages dans la partie ouest du pluton, l'accès aux affleurements a parfois nécessité l'utilisation de l'hélicoptère (Figure 3.1 a et b) pour cartographier et échantillonner les roches dans ce secteur.

Une fois sur le terrain, les affleurements ont été minutieusement observés et soigneusement décrits et échantillonnés après avoir éliminé la mousse à l'aide d'une hache. La géologie des affleurements a été décrite et répertoriée sur 81 fiches géologiques à l'aide d'une tablette numérique (figure 3.1 c). Les mesures structurales ont été réalisées à l'aide d'une boussole Brunton.

L'échantillonnage a été adapté à la granulométrie des roches : dans le cas des granites, dont la granulométrie est relativement fine, nous avons prélevé entre 1 et 2 kg de matériau, alors que pour les pegmatites, nous avons ciblé les faciès moins grossiers et polyminéraliques de plus de 2 kg. Les échantillons ont généralement été prélevés à l'aide d'un marteau et d'un burin, ainsi qu'une scie portative pour certains affleurements plats (figure 3.1 d et e). Une fois extraits, les échantillons ont été placés dans des sacs plastiques étiquetés (avec un feutre indélébile) et géoréférencés à l'aide du GPS (Garmin GPSMAP 60CSx). La plupart des affleurements visités ont été échantillonnés (61 échantillons), et les échantillons collectés ont fait l'objet d'une étude complète comprenant la coloration des sections, la minéralogie (lames minces) et des analyses chimiques approfondies.

Sur la pegmatite à spodumène du gisement Authier, des échantillons prélevés sur différents segments du dyke ont été analysés pour comparer les valeurs chimiques entre elles (Rajhi et al., 2024). De même, trois échantillons ont été prélevés dans différentes zones d'une pegmatite complexe à béryl afin de vérifier la variabilité des ratios chimiques. Les échantillons mettent en évidence une variabilité marquée en termes de texture et de minéralogie, ainsi que des ratios chimiques (Rajhi et al., 2024).

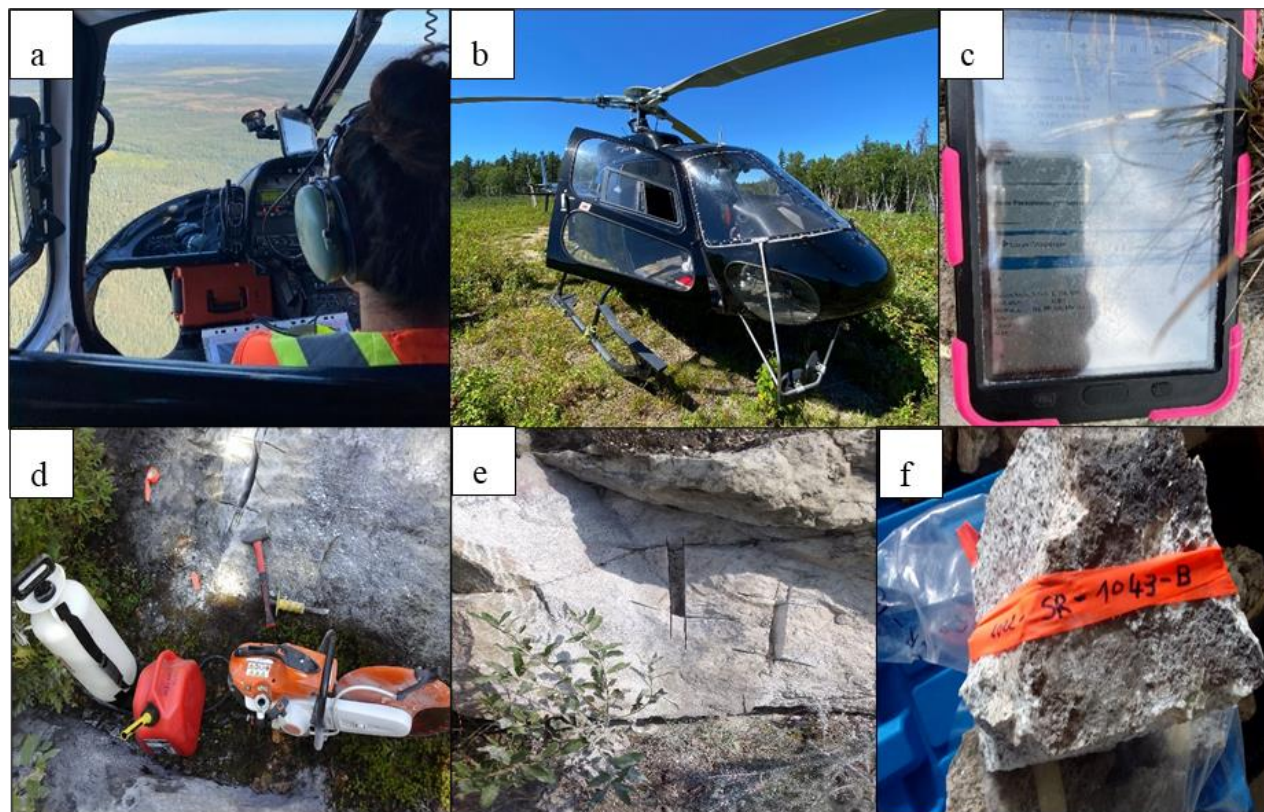


Figure 3.1. Détails techniques de la description des affleurements. a et b) Transport en hélicoptère pour les affleurements difficiles d'accès; c) Génération de géofiches (81) à l'aide d'une tablette électronique ; d et e) Prise d'échantillons à l'aide de la scie portative; f) Exemple d'échantillon de granite pris par marteau et burin.

3.3 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons pour la réalisation des sections pour coloration, des lames minces et des analyses chimiques a été effectuée en utilisant une scie fixe circulaire diamantée (Figure 3.2). Le processus de sciage consistait à enlever toute altération de surface et produire une section pour la coloration au cobaltinitrite de sodium, un "sucre" de dimension standard (27x46 mm) pour la confection de lame mince et des blocs pour 1-2 kg au total pour les analyses chimiques. Cette opération a été réalisée à l'unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) au sein de l'Institut de recherche en mines et environnement (IRME).



Figure 3.2. Scie fixe pour préparation des échantillons pour les lames minces, les analyses chimiques et le test de coloration.

3.4 Étude pétrographique

3.4.1 Coloration par le cobaltinitrite de sodium et analyse chromatique

Les soixante-et-un (61) échantillons ont été soumis au test de coloration des feldspaths potassiques à l'aide du cobaltinitrite de sodium. Selon le protocole décrit par Goutier et al. (2001), les plaques de roches (environ 10 cm x 10 cm x 2-3 cm) ont été attaquées pendant 30 secondes à l'acide fluorhydrique (48 %), puis rincées à l'eau du robinet. Ensuite, elles ont été trempées pendant 30 secondes à 1 minute dans une solution saturée de cobaltinitrite de sodium mélangé à de l'eau du robinet (environ 60 g par 100 ml). Les plaques ont ensuite été rincées à l'eau du robinet et laissées sécher. Ce protocole est illustré en détail dans les photos de la figure 3.3. Cette méthode de coloration permet de teinter en jaune les feldspaths potassiques et d'accentuer le contraste avec les autres minéraux présents.

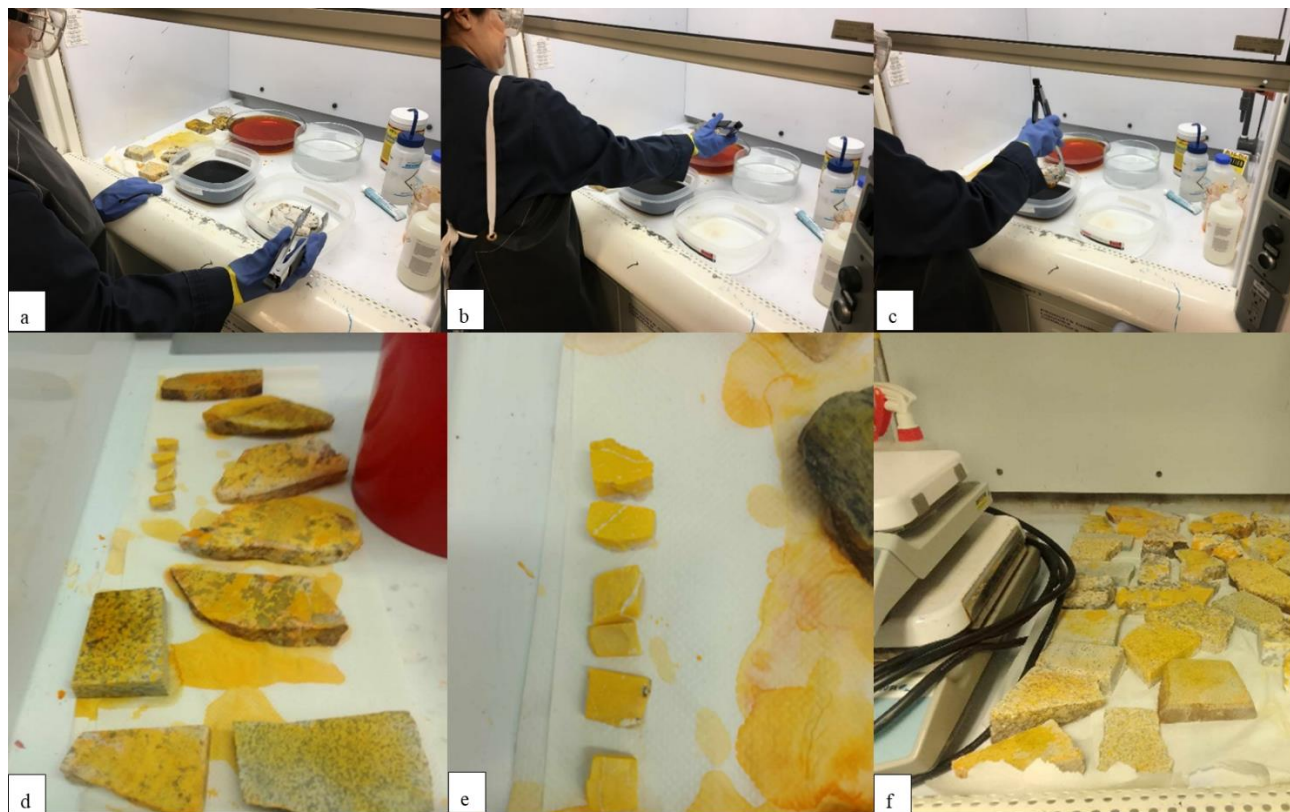


Figure 3.3. Coloration au cobaltinitrite de sodium. a) Immersion de la plaque de roche dans de l'acide fluorhydrique (48%) pendant 30 secondes. b) Rinçage à l'eau du robinet. c) Trempage de la roche dans une solution saturée de cobaltinitrite de sodium mélangé à de l'eau du robinet (environ 60 g pour 100 ml) pendant 30 secondes à 1 minute. d) Séchage des roches. e) Prélèvement de petits morceaux de feldspath potassique comme témoin pour vérifier la coloration et la conservation des propriétés de la solution. f) Échantillons en cours de séchage sous la hotte.

L'analyse chromatique effectuée à l'aide du logiciel open source ImageJ, a été appliquée sur toutes les sections après leur coloration par le cobaltinitrite de sodium, permettant ainsi de déterminer de façon systématique et non biaisée le pourcentage du feldspath potassique (jaune) et d'albite (blanc). Le processus de traitement d'image implique tout d'abord l'importation de l'image et sa conversion en couleur RVB. Par la suite, un ajustement du seuil de couleur est réalisé pour bien distinguer le jaune des nuances de bleu. Après avoir trouvé la bonne correspondance, l'image est convertie en noir et blanc pour simplifier l'analyse. Pour la quantification des pixels blancs (qui représente le jaune) un polygone est dessiné autour de la roche et la fonction d'analyse des particules est utilisée. Toutes ces étapes sont illustrées dont la figure 3.4. Pour mesurer le pourcentage d'albite dans les

échantillons, le même procédé est utilisé, mais elle nécessite une adaptation des paramètres RVB. Lors de la deuxième étape, il est important de modifier la couleur du seuil en blanc. Ce léger changement des réglages permet d'isoler précisément l'albite pour une bonne analyse. Compte tenu de la taille des cristaux et de la variabilité minéralogique des échantillons de pegmatite, le rapport feldspath potassique/albite peut beaucoup varier à l'intérieur d'un même échantillon. La constance du ratio feldspath potassique/albite pour les échantillons d'une même famille de pegmatite indique que la sélection des échantillons est représentative.

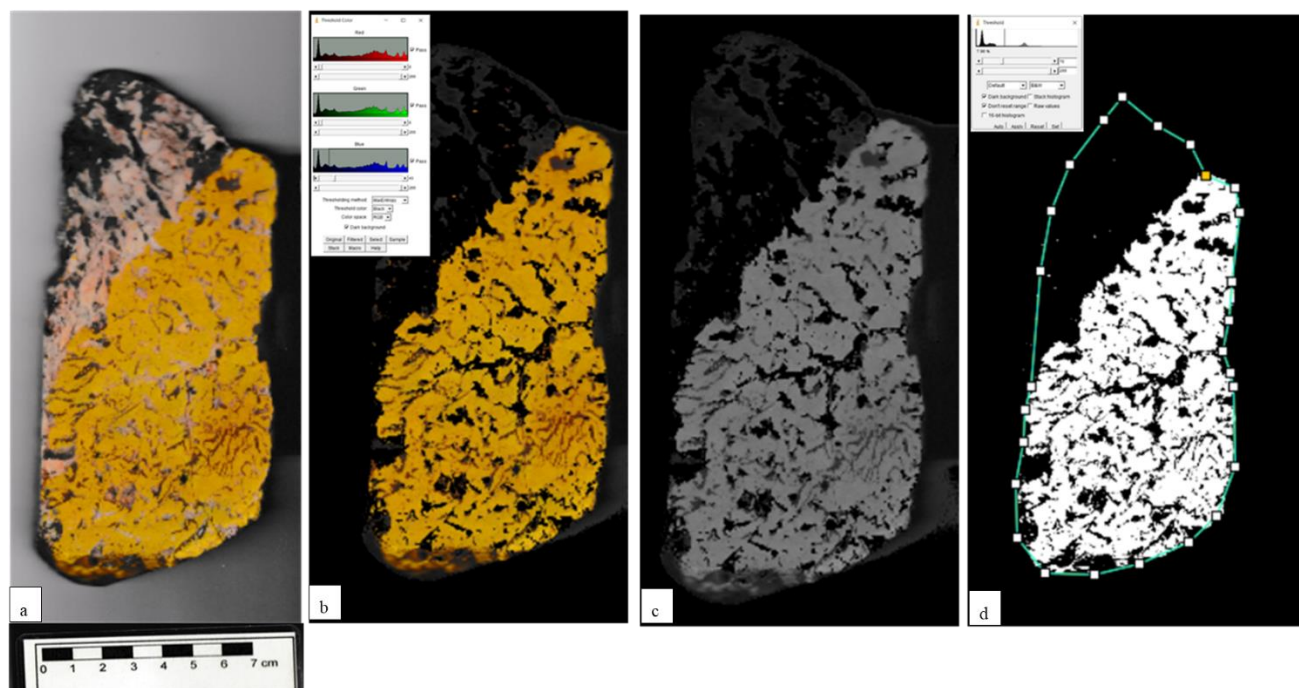


Figure 3.4. Photos montrant les étapes de l'analyse chromatique sur ImageJ des scans des roches (pegmatites) traitées au cobaltinitrite de sodium. a) Image RGB non filtrée d'un scan de pegmatite colorée à l'acide. b) Image RGB suite au ColorThreshold du scan de pegmatite. c) Image 8bit après ColorTreshold. d) Image 8bit après Treshold B&W, le tracé vert illustre le polygone à l'intérieur duquel la proportion de pixels blancs sera calculée en utilisant l'outil Analyze particles.

3.4.2 Examen au microscope optique

Un total de soixante-et-une (61) lames minces de roches granitiques et pegmatitiques ont été préparées, dont trente-six (36) lames polies contre des lames ordinaires pour les autres. Elles ont été examinées dans le laboratoire de l'URSTM. Le microscope utilisé pendant cette étude était un Zeiss Axio Imager équipé d'une platine motorisée et d'une caméra numérique (Figure 3.5).

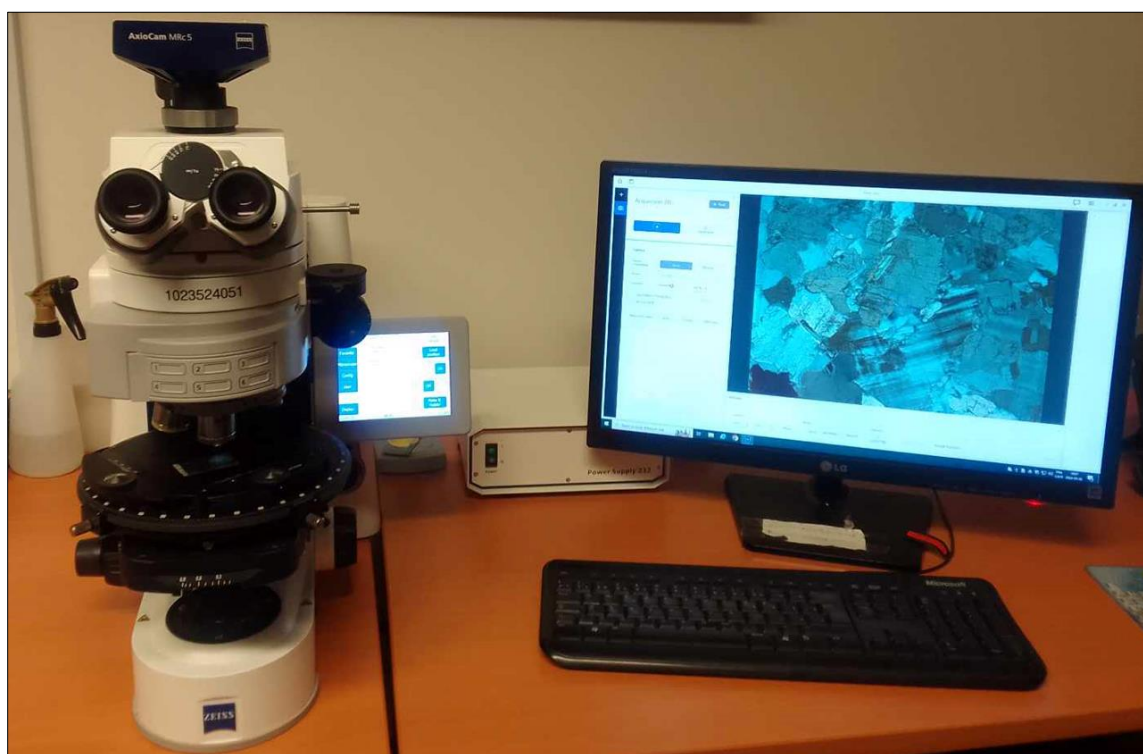


Figure 3.5 Station de microscopie Zeiss Axio Imager pour l'observation des lames minces.

3.4.3 Analyse par microsonde électronique

L'analyse minéralogique par microsonde électronique (EPMA) (Figure 3.6) est une méthode de pointe utilisée pour déterminer la composition chimique précise des minéraux à l'échelle microscopique. Cette technique s'appuie sur l'interaction d'un faisceau d'électrons concentré avec un échantillon cible, induisant l'émission de rayons X spécifiques aux éléments présents (Duchesne, 2014). Ces rayons X sont collectés et analysés pour obtenir des informations détaillées sur la composition chimique du minéral étudié. Dans cette étude, douze lames minces polies ont

été sélectionnées pour analyse au laboratoire de microanalyse de l'Université Laval (CAMECA SX-100). L'accent a été mis sur des analyses ponctuelles de minéraux clés pré-identifiés par microscopie optique, tels que le feldspath potassique, la muscovite, le grenat et la colombo-tantalite. Les mesures ont été effectuées sur plusieurs grains de chaque minéral dans chaque lame mince pour garantir la bonne qualité et la représentativité des résultats. Les analyses ont été réalisées en mode dispersion de longueur d'onde avec une tension d'accélération de 15 kV, un courant de faisceau de 20 nA et une taille de spot de 5 μm . Les éléments majeurs ont été mesurés pendant des durées de 15 à 20 secondes au pic, tandis que les éléments mineurs et traces ont été analysés pendant 15 à 60 secondes selon l'élément. Les comptages de fond ont été effectués à la moitié du temps de comptage du pic, avec des décalages allant de -250 à -600. Les données brutes ont été transformées en concentrations en utilisant des corrections de matrice PAP (Pouchou and Pichoir). Les autres détails analytiques sont précisés en annexe 3. Les données chimiques recueillies ont été traitées à l'aide du logiciel spécialisé LithoModeller 4.41 du CONSOREM.



Figure 3.6. Microsonde électronique CAMECA SX-100 pour l'analyse minéralogique au département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.

3.5 Analyses géochimiques

Soixante et un (61) échantillons de pegmatites et de granites ont été envoyés pour analyse géochimique au laboratoire Activation Laboratories Ltd. (ACTLAB) à Ancaster, Ontario. Ces échantillons ont été préparés par broyage avant d'être analysés pour leurs éléments majeurs, traces et certains éléments rares, en utilisant des techniques de spectrométrie d'émission atomique telles que l'ICP-MS et l'INAA. Une analyse particulière pour le lithium a également été réalisée par TD-ICP (Total Digestion Inductively Coupled Plasma). Les méthodes de contrôle de qualité du MRNF avec blancs, standards et duplicatas ont assuré la qualité des résultats. Ces analyses se retrouvent dans la base de données du SIGÉOM. Les éléments majeurs présentent des variations de moins de 5 %, tandis qu'elles peuvent atteindre jusqu'à 10 % pour les éléments traces. Les données chimiques recueillies ont ensuite été traitées à l'aide du logiciel LithoModeller 4.41.

Chapitre 4 ARTICLE: CHARACTERIZATION OF PEGMATITES IN THE LA MOTTE AREA, PREISSAC- LA CORNE PLUTONIC SUITE, ABITIBI SUBPROVINCE AND ITS IMPLICATIONS FOR EXPLORATION

4.1 Préambule

Ce passage introduit un manuscrit proposé à la revue *Journal of Geochemical Exploration*, portant sur la caractérisation des pegmatites dans la région du Batholite de La Motte, Suite Plutonique de Preissac-La Corne, Sous-province de l'Abitibi et ses implications pour l'exploration. Le document a été officiellement soumis le 11 mars 2024. Sabrina Rajhi, rattachée à l'Institut de Recherche en Mines et Environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), mène cette recherche en qualité d'auteur principal, avec la collaboration de Marc Legault, également de l'IRME-UQAT, Hubert Mvondo (MRNF-UQAT) et Robin Potvin de l'UQAT comme co-auteurs.

4.2 Résumé

Ce projet étudie les caractéristiques des pegmatites dans le secteur du Batholite de La Motte (BLM), sous-province d'Abitibi, situé entre Rouyn-Noranda et Val d'Or, et environ 30 km à l'ouest de la mine de lithium d'Amérique du Nord (101,9 Mt @ 1,06% Li₂O; Sayona Québec). La zone d'étude accueille des minéralisations en minéraux critiques et stratégiques, notamment le gisement d'Authier, associées exclusivement à des pegmatites Li-Cs-Ta. L'objectif est de caractériser les propriétés minéralogiques et géochimiques des pegmatites pour mieux cibler l'exploration du lithium. Cette caractérisation permet de subdiviser différents types de pegmatites dans le secteur BLM, des amas stériles aux dykes riches en spodumène. Les faciès pegmatitiques du BLM présentent des caractéristiques chimiques similaires à celles des dykes de pegmatite intersectés, suggérant un lien génétique malgré une différence d'âge de plusieurs millions d'années. Les résultats confirment également que les rapports élémentaires d'analyses de roche totale (K/Rb,

K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf) au sein des dykes lithinifères montrent les plus faibles valeurs comparées aux autres dykes, indépendamment de l'endroit où l'échantillonnage a été effectué au sein du même dyke. Les analyses microsondes de feldspath potassique et de muscovite de différentes pegmatites révèlent également des rapports K/Rb et K/Cs similaires aux analyses de roche totale, renforçant ainsi l'évaluation du degré de fractionnement des pegmatites BLM. Ces rapports permettent donc de cibler les secteurs abritant des dykes hautement fractionnés même là où le spodumène n'a pas encore été identifiée.

4.3 Abstract

This project focuses on the study of pegmatite characteristics in the La Motte Batholith (LMB) sector in the Abitibi Subprovince, located between the cities of Rouyn-Noranda and Val d'Or, and approximately 30 km west of the North American Lithium mine (101.9 Mt @ 1.06% Li₂O; Sayona Québec). The study area hosts mineralizations in critical and strategic minerals, most notably the Authier deposit, which are exclusively associated with Li-Cs-Ta pegmatites. The aim of the study is to characterize the mineralogical and geochemical properties of the pegmatites in the sector to better target lithium exploration. This characterization enables the subdivision of various families of pegmatites in the LMB sector, ranging from barren pods to spodumene-rich dykes. Within the LMB, the pegmatitic facies exhibit chemical characteristics similar to those of intersecting pegmatite dykes, suggesting a genetic link between the La Motte Batholith monzogranite and the different pegmatite families despite a possible age difference of several million years. The results also confirm that elemental ratios from whole-rock analyses (K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf) within lithium-bearing dykes show the lowest values compared to other dykes, regardless of the sampling location within the same dyke. Potassium feldspar and muscovite microprobe analyses from different pegmatites also reveal K/Rb and K/Cs ratios similar to whole-rock analyses, thereby strengthening the assessment of the fractionation degree of the LMB pegmatites. These ratios thus allow for targeting sectors hosting highly fractionated dykes even where spodumene has not yet been identified.

Keywords: pegmatite, lithium, spodumene, fractionation, exploration.

4.4 Introduction

The growing popularity of electric vehicles (EVs) as a mean of mitigating global warming has led to a surge in lithium prospecting in the Superior Province of Québec, more specifically in the margins of the Preissac-La Corne Plutonic Suite where numerous spodumene + colombo-tantalite + beryl discoveries have been made since the 1940's (Boily and Gosselin, 2004). Indeed, this area is host to the only active lithium mine in Canada (North American Lithium mine; Sayona Québec).

According to the original model of Trueman and Černý (1982) that was later refined by Černý (1991a, b), London (2018), and others, Lithium-Cesium-Tantalum (LCT)-rich pegmatites form from extreme fractional crystallization of a granitic magma enriched in rare and volatile elements. This model is based on significant chemical variability of pegmatite dyke swarms found in concentric zones around a parent pluton. Previous studies have shown that barren pegmatites are typically found in and near the pluton, whereas pegmatites enriched in rare elements tend to be farther away (Černý, 1991b; Breaks et al., 2005; London, 2014). This chemical zoning is accompanied by a mineralogical zoning with two-mica pegmatite dykes found within the pluton, whereas spodumene, lepidolite, beryl, and columbite-tantalite pegmatite dykes occur farther away (Černý, 1991b;). A similar zoning was proposed for the Preissac-La Corne Plutonic Suite as early as the 1950's by Tremblay (1956) and later generalized by Mulja et al. (1995a) and Boily (1995). Geochemical element ratios, including K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf, (Cerny et al., 1985; Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019; Legault (2023a)) are commonly used to assess the fractionation intensity and lithium prospectivity of pegmatites.

The present research aims to provide a comprehensive understanding of the geochemical and mineralogical characteristics of LCT pegmatites associated with the La Motte Batholith (LMB) to optimize regional lithium exploration. To this end, pre-existing data are combined with field and petrographic observations, and geochemical analyses to assess the fertility of the LMB and define a targeting approach for exploration of lithium-bearing pegmatites in the area.

4.5 Geological Context

4.5.1 Regional Geology

The studied region is located in the southern part of the Abitibi Subprovince, between Val-d'Or and Rouyn-Noranda and comprises of the Archean (2681-2643 Ma; Feng and Kerrich, 1991) Preissac-La Corne Plutonic Suite (PLCPS, Figure 4.1). This magmatic suite is represented by three main plutons, including the Preissac, La Corne, and La Motte plutons, which have intruded in low- to medium-grade volcano-sedimentary rocks of the Caste Formation, the Malartic Group, and the Kinojévis Group (Imreh, 1984; Pilote et al., 2007, 2009). The La Corne and La Motte plutons are lens-shaped with E-W trending long axis subparallel to the Manneville faults on the northern and southern sides of the plutons. On the other hand, the Preissac pluton in the southwest of the La Motte Batholith is located between the South Manneville fault and the Parfouru fault (Daigneault et al., 2002) (Figure 4.2). The PLCPS has been divided into early-and late-formed suites. The former is a metaluminous dioritic to granodioritic suite with abundant hornblende, rich in metasedimentary and metavolcanic xenoliths whereas the later consists of a peraluminous monzogranite with rare metal-enriched (Li, Be, Ta, and Mo) pegmatite dyke swarms on the margins (Rowe, 1953; Tremblay, 1956; Dawson, 1966; Bourne and Danis, 1987; Boily et al., 1989; Boily, 1992, 1995; Mulja et al., 1995a, 1995b) (Figure 2).

4.5.2 Local Geology

4.5.2.1 The La Motte Batholith

The LMB forms the northwestern part of the PLCPS (Figure 4.2), intrusive in the sedimentary units of the Caste Formation and the ultramafic volcanic units of the La Motte-Vassan Formation (Pilote et al., 2007, 2009) that were metamorphosed to the amphibolite facies conditions close to the pluton.

Like for the PLCPS, the LMB has been subdivided in an early, hornblende-rich, metaluminous dioritic to granodioritic suite and a late, peraluminous, granitic suite. The early-formed suite is restricted to the eastern part of the intrusion and contains numerous metasedimentary and metavolcanic xenoliths (Figure 4.2). In contrast, the late suite is

represented by a muscovite and biotite monzogranite forming most of the LMB batholith and that was dated at ca. 2647–2641 Ma; (Machado et al., 1991; Ducharme et al., 1997).

The LMB exhibits a north-dipping ($0-40^\circ$), east-west striking magmatic foliation (Figure 4.3) defined by the preferred orientation of feldspars and micas (Dawson, 1966; Daigneault et al., 2002). A discrete downdip stretching lineation is found within this foliation. The foliation intensity decreases gradually from the edge inward suggesting that the LMD was emplaced syn-kinematically as a sill-like body subparallel to the regional foliation (Daigneault et al., 2002). Both the foliation and related lineation are subparallel to the Manneville thrust zone representing the main tectonic feature in the area (Daigneault et al., 2002) (Figure 4.3). Second-order structures connected to the Manneville thrust and represented by steep to northward-dipping, east- and east-southeast-striking dextral shear zones, including the Aiguebelle and South Manneville shear zones, are also found (Figure 4.2).

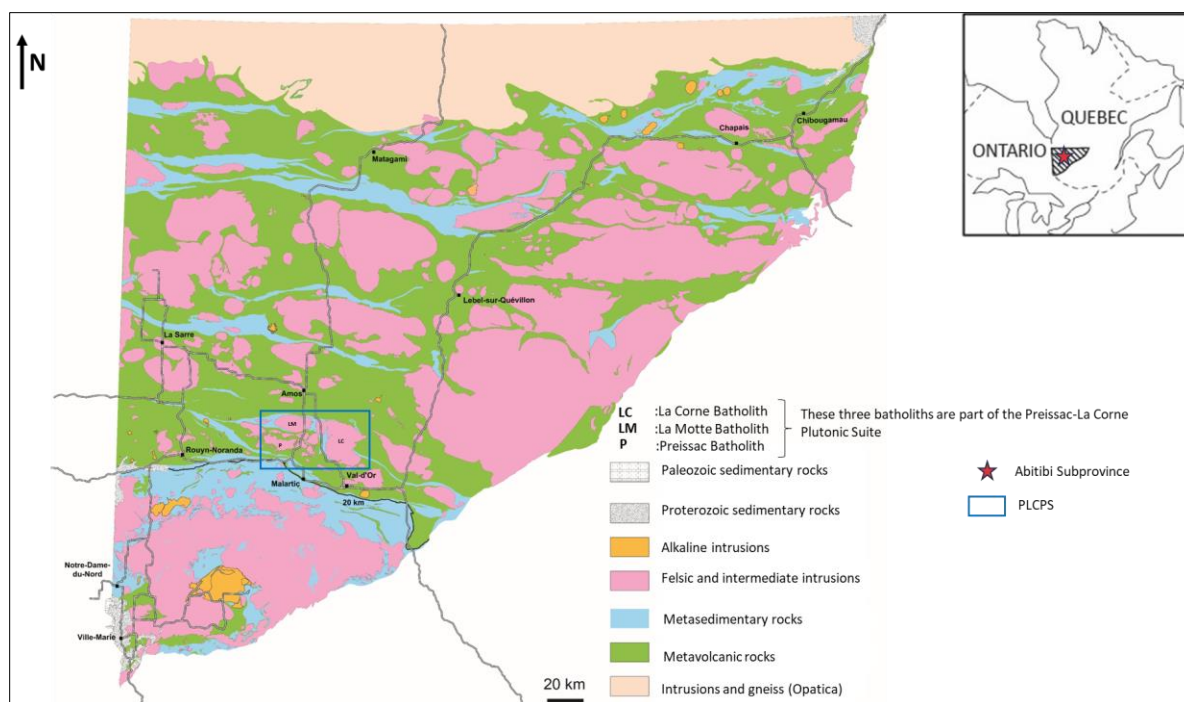


Figure 4.1. Geological map of the Quebec portion of the Abitibi Subprovince illustrating the location of the Preissac-La Corne Plutonic Suite (blue rectangle).

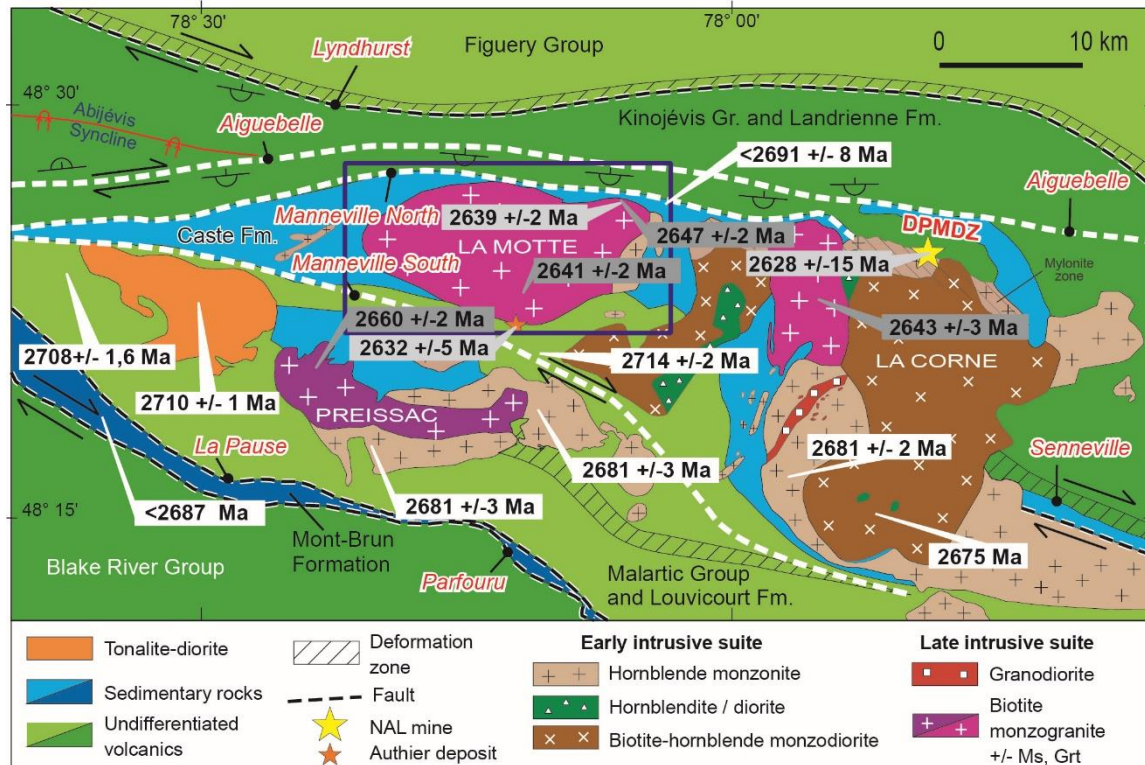


Figure 4.2. Geology of the Preissac - La Corne Plutonic Suite area. The study area is delineated by the blue rectangle. U-Pb geochronological data: dark grey = monzogranite; light grey = pegmatite dyke; white = others. See text for details pegmatites geochronology. MTZ = Manneville Thrust Zone; PDDMZ = Porcupine-Destor-Manneville Deformation Zone. Modified from Pilote et al. (2018) with additional U-Pb geochronology by Machado et al. (1991), Ducharme et al. (1997) and Davis (2022, 2023).

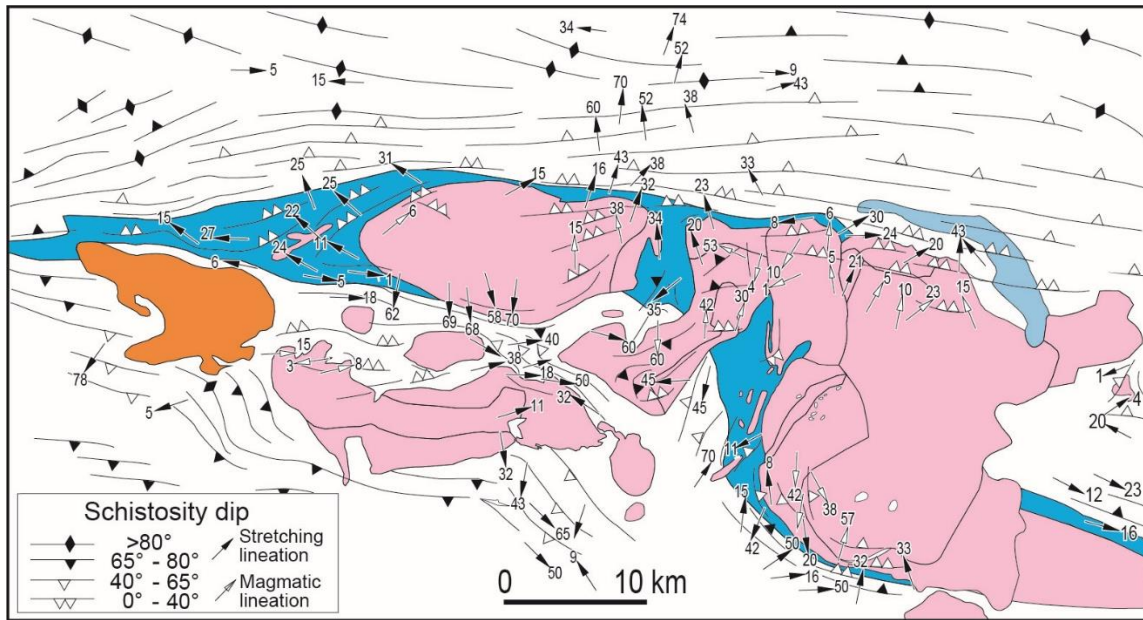


Figure 4.3. Structural map showing the trajectories of the main schistosity and stretching lineations of the La Motte Batholith and surrounding rocks. Adapted from Pilote et al. (2018).

4.5.3 LMB pegmatites

Whitish to brownish aplite-pegmatite dyke swarms, with individual dykes ranging in size from a metre to several tens of metres wide and from a few metres up to a kilometer long, are unevenly distributed around the LMB (Dawson, 1966). Generally, they are steep to subvertical features, most of which are oriented east-west compared to a minority of northeast and northwest-directed dykes (Figure 4.4). Also, some of the dykes are unzoned and dominantly pegmatitic with a preferred orientation of minerals perpendicular to the margins, whereas others are rhythmically aplite-pegmatite zoned. The two types of textures are not mutually exclusive but occur variably along strike. In either case, dykes with a clear quartz core are uncommon.

The dykes show mineralization consisting mainly of beryl, spodumene, molybdenum, and colombo-tantalite as reported in previous studies (Norman, 1944; Rowe 1953; Dawson, 1966; Boily, 1992; Mulja et al., 1995a). The lithium-mineralized dykes are primarily associated with coarse crystalline spodumene in a quartz core and are located mainly on the northeast and southeast outskirts of the batholith (Figure 4.5). Molybdenum

dykes are rather located on the western edge with mineralization in molybdenite, quartz, muscovite, and garnet. These different rare-metal mineralization types have been attributed to the most differentiated pegmatite dykes (Norman, 1945; Boily, 1995; Mulja et al., 1995b). Altogether, these dykes attributed to the late peraluminous suite have been geochemically interpreted as genetically related and forming a spatial zonation around the LMB (Boily, 1995; Mulja et al., 1995b). Thus, it was suggested based on previous studies that the beryl pegmatite dykes occur mostly within the monzogranite, whereas the spodumene-beryl and the spodumene pegmatites are found near the LMB margins and in the host rock, respectively (Norman, 1944; Ayres et Cerny, 1982; Boily, 1992; Mulja et al. 1995a, 1995b; Figure 4.5). Along the same line, Mulja et al. (1995a) have shown that the beryl and the spodumene pegmatite dykes were emplaced progressively, with the first filling pressure-induced fractures in the parent granites and the second occupying fractures in the host rocks.

But spodumene pegmatite dykes documented in the northern portion of the LMB (Rowe, 1953; Boily et al., 1989) (Lac des Hauteurs showing; Figure 4.5), suggest a different scenario whereby these dykes were episodically emplaced. This observation questions the modeled zonation pattern observed around parent source granites that does not specify the presence of such intraplutonic spodumene dykes. Indeed, a beryl-bearing pegmatite cross-cutting the late monzogranitic phase of the LMB has been dated at 2639 ± 2 Ma (Ducharme et al., 1997) contrasting with 2632 ± 5 Ma (Davis, 2023) given by a spodumene pegmatite from the Authier deposit.

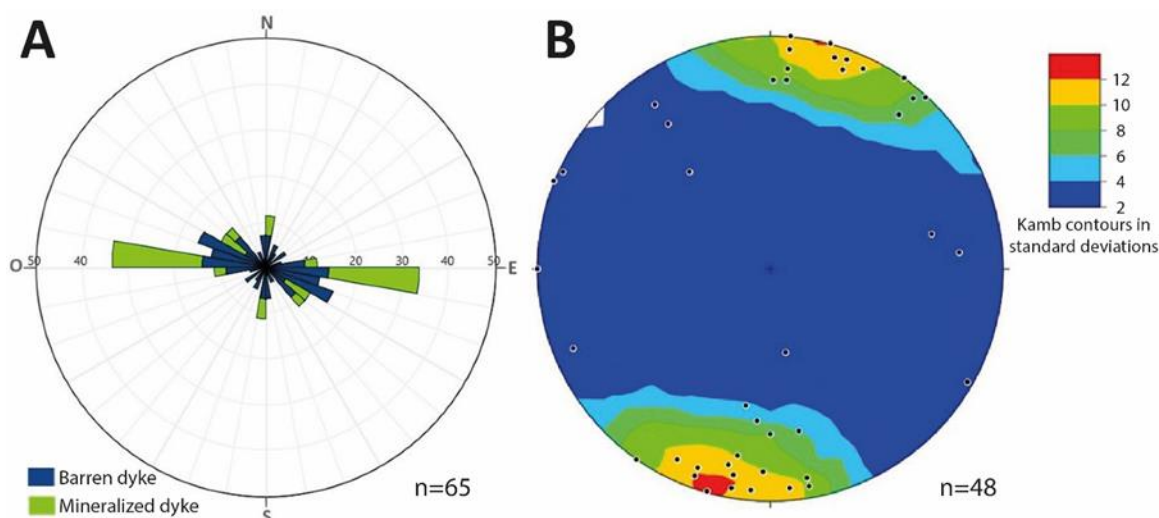


Figure 4.4. Compilation of dyke measurements with and without dip from this study on a rose diagram (A) and only those with dip on a stereonet (B). The modified Kamb pole concentration method was used.

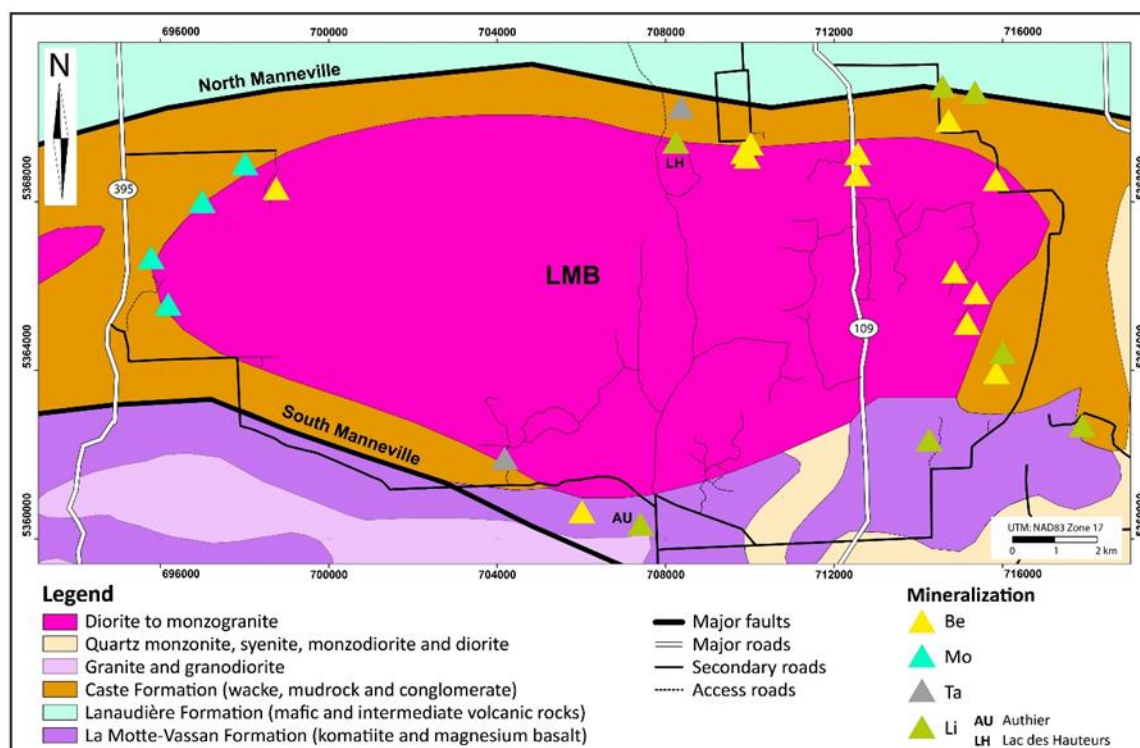


Figure 4.5. Location of Be, Mo, Ta and Li showings/deposits in the La Motte Batholith area on the geological map adapted from SIGEOM (2022) and geological compilation maps (Ministry of Energy and Resources, 1984).

4.6 Methods

4.6.1 Data compilation and sampling

Historical geochemical data from the study area was verified and compiled to strategically prepare for the sampling campaign. The verification consisted in checking for accuracy and location of historical sampling using ArcGIS with LIDAR survey (www.foretouverte.gouv.qc.ca). Quality control was conducted through random verification of samples, their locations, and their values, ensuring their accuracy by comparing the new analyses with historical data.

The mapping campaign aimed to sample mineralised and non-mineralised dykes in the areas of interest and data fill gaps therein. Access to the outcrops was facilitated by new forest access roads (Figure 4.5). Outcrops were cataloged on standardized outcrop description forms (geofiches which are accessible on the Ministry of Natural Ressources and Forestry's SIGEOM geological database) and sampled meticulously in less coarse facies for a comprehensive study including mineralogy and chemical analyses. Sampling was adapted to the grain size of the rocks: for granites of relatively fine grain size, between 1 and 2 kg of material was collected, whereas for pegmatites, less coarse and polymineralic facies of more than 2 kg were targeted. On the spodumene-bearing pegmatite of the Authier deposit, samples taken from different segments of the dyke were analyzed and compared with each other. The work showed that despite their spatial, textural, and mineralogical diversity, geochemical ratios were highly homogeneous (Rajhi et al., 2024). A total of 61 samples, including 32 granite, 28 pegmatite, and 1 aplite samples were collected for this study.

4.6.2 Chromatic Analysis

All the rock samples were considered for potassium feldspar using staining sodium cobaltinitrite as outlined by Goutier et al. (2001). This staining method allowed the evaluation of potassium feldspar and plagioclase proportions for granite and pegmatite samples.

4.6.3 Geochemical Analyses

Sixty-one samples of pegmatite, granites and aplite were sent for geochemical analysis to Activation Laboratories Ltd. (ACTLAB) in Ancaster, Ontario. These samples were analyzed for their major, trace, and some rare elements, using atomic emission spectrometry techniques such as ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) and INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis). A specific analysis for lithium was also carried out using TD-ICP (Thermal Desorption Inductively Coupled Plasma). These analyses are available in the SIGEOM database. Major elements show variations of less than 5%, whereas it reaches up to 10% for trace elements.

4.6.4 Electron Probe Microprobe Analysis (EPMA)

In this study, 61 thin sections were observed under optical microscope of which 12 polished thin sections were selected for EPMA analysis using CAMECA model SX-100 at the microanalysis laboratory of the Laval University. The focus was on spot analysis of key minerals pre-identified by optical microscopy, such as potassium feldspar, muscovite, garnet and columbite-tantalite. Measurements were made on multiple grains of each mineral to ensure the quality and representativeness of the results. Analyses were carried out in wavelength-dispersive mode and accelerating voltage of 15 kV with a beam current of 20 nA, and a spot size of 5 μm . Major elements were measured for durations of 15 to 20 seconds at the peak, while minor and trace elements were analyzed for 15 to 60 seconds depending on the element. Background counts were conducted at half the peak counting time, with offsets ranging from -250 to -600. Raw data were transformed into concentrations using PAP matrix corrections.

4.7 Results

4.7.1 Petrographic characteristics

4.7.1.1 LMB granites

The LMB study area is highlighted by the presence of three facies of granite, namely biotite granite, two-mica granite, and muscovite granite, which had also been identified by Boily

(1992) and Mulja et al. (1995a) within the PLCPS (Table 4.1). These granites display a range in color from whitish to pinkish and are generally leucocratic (<10% vol. ferro-magnesian minerals). The major difference of granite phases, apart from the type of mica, is the grain size. For more details on the composition and alteration of these granites, see Table 4.1 and Figure 4.6.

Tableau 4.1. Summary table of petrographic properties of granites within the three facies. Estimated modal percentages are established from microscopic observations and colored sections.

Granite	Biotite	Two mica	Muscovite
Grain size	0.5 to 5mm	1 to 5 mm	5 mm to ≤ 3cm
Main mineral assemblage	Quartz (30-35%, up to 40%) Plagioclase (albite to oligoclase) (35-40%) Potassium feldspar with perthitic texture (microcline and orthoclase) and locally anorthoclase (20-35%)		
Biotite (%)	5-8%	Biotite ~ muscovite	~1%
Muscovite (%)	~2%		6-10 %
Alteration	Chloritization of biotite Sericitization of plagioclase		
Minéraux accessoires	Garnet, apatite (most often as inclusions in quartz), zircon (in inclusions in biotite), tourmaline, sericite, and magnetite		

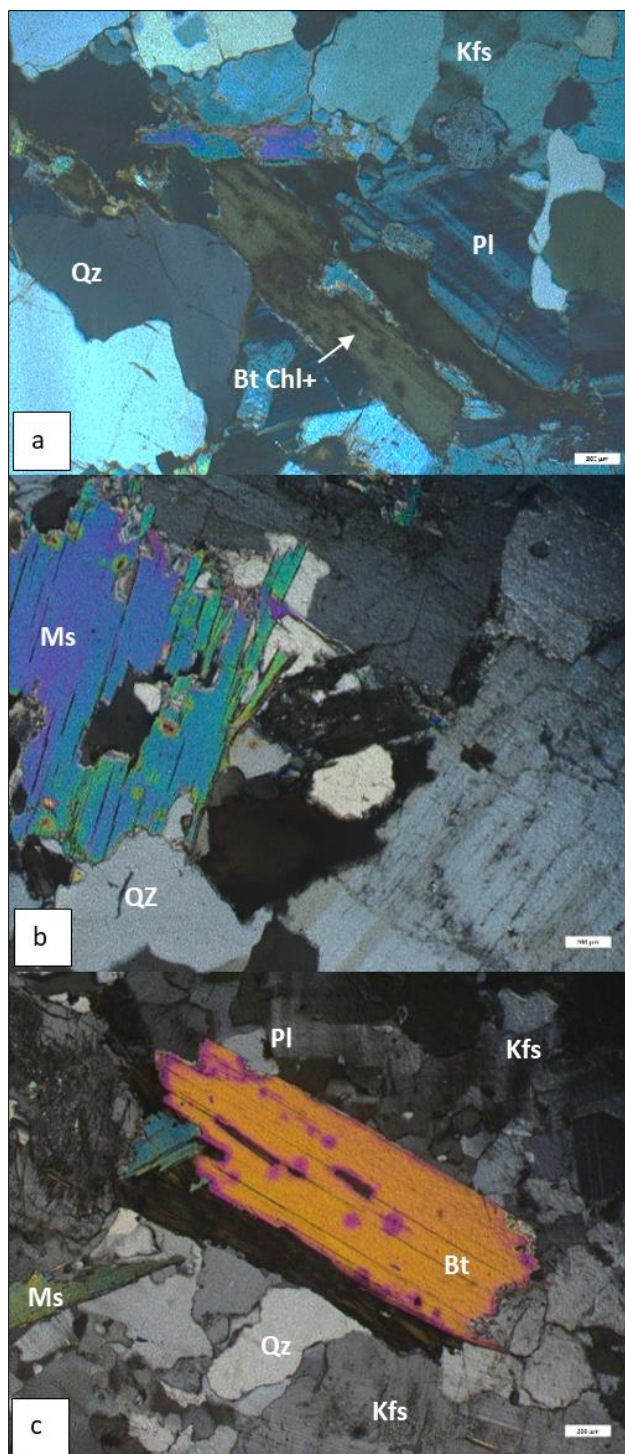


Figure 4.6. Microphotographs of granites. a) Biotite granite showing chloritized biotites. Sample 2022-SR-1035A. b) Muscovite granite with fresh magmatic muscovites. Sample 2022-SR-1043B. c) Two-mica granite with the presence of zircon inclusions in the biotites. Sample 2022-SR-1051A. Abbreviations: Bt = Biotite, Chl+ = Chloritization, Kfs = Potassium Feldspar, Ms = Muscovite, Pl = Plagioclase, Qz = Quartz. Scalebar 200µm.

4.7.1.2 LMB Pegmatites

Previous research, particularly by Boily (1992, 1995) and Mulja et al. (1995a, 1995b) concerning the SPPLC, has laid a robust foundation for the geochemical and petrological understanding of LMB pegmatites, emphasizing the significance of minerals such as beryl and spodumene. The current study builds on this fundamental research to provide a more comprehensive and detailed analysis of LMB pegmatites, aiming to offer a clear view of the different pegmatitic families at the scale of the LMB sector and to enhance the process of lithium exploration in the region.

The granitic pegmatites of the LMB sector are distinguished from the less coarse-grained monzogranite by their leucocratic, massive, and distinctly pegmatitic nature. Within the LMB, these are usually barren, and form pods and lenses of homogeneous composition in gradational contact with the finer-grained granite but also as sharp-contact dykes (Figure 4.7). Their predominant composition is characterized by an abundance of quartz and potassium feldspar, with a lesser amount of albite. These minerals are often accompanied by silvery muscovite, especially concentrated at contact zones. Occasionally, small flakes of biotite and other accessory minerals, such as garnet, are observed. Based on the host minerals of rare elements, the pegmatites are classified into families, namely beryl, colombo-tantalite, and spodumene (Table 4.2), dispersed along the inner and outer margins of the LMB. These dykes are generally zoned, showing mineralogical and granulometric variation from the border to the center. Spodumene pegmatites are primarily found in the surrounding rocks, with the exception of a dyke identified in the northern part of the LMB (Lac des Hauteurs showing; Figure 4.5). Thin sections of barren pegmatites within the LMB exhibit a predominance of quartz and perthitic potassium feldspars, as well as albite, primary and secondary (finer hydrothermal) muscovite, and, more rarely, garnet, biotite, and beryl. The peripheral pegmatites and those in the Caste and La Motte-Vassan Formations share a similar composition, enriched in spodumene, colombo-tantalite, and occasionally molybdenite. They also present more albite and less potassium feldspars. Under the microscope, these pegmatites reveal more developed mineralogical phases. They are primarily composed of extensive sections of interlaced feldspars with quartz crystals,

often accompanied by garnet. The main mineralogical features of the pegmatites are summarized in Table 4.2 and Figures 4.8 and 4.9.

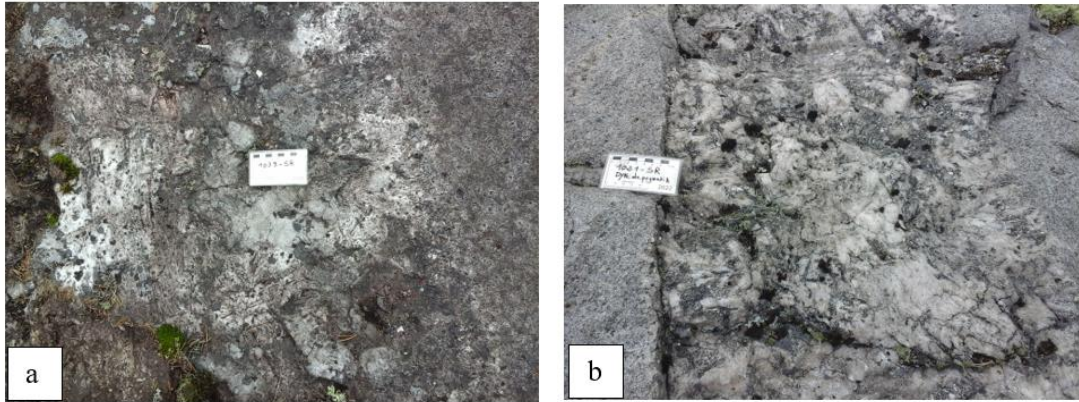


Figure 4.7. Typical barren pegmatites within the LMB. a) Pegmatite in gradational contact with finer-grained granite. Outcrop 22-SR-1039. b) Pegmatitic dyke in sharp contact with finer-grained granite. Outcrop 23-SR-1021.

Tableau 4.2. Summary of mineralogical characteristics of the four (4) principal families of LMB pegmatites. Abbreviations: Ab=albite, Kfs=K-feldspar.

Pegmatite and structure		Position versus LMB	Principal minerals frequently encountered (in decreasing order of abundance)	Cobaltinitrite sodium staining test
				Ratio Kfs /Ab
Barren	Cluster, lens, dyke	Interior and exterior	Quartz, potassium feldspar, albite, milky to grayish muscovite, garnet, biotite, magnetite	Kfs/AB >1
Béryl	dyke	Interior and exterior	Quartz, potassium feldspar, albite, beryl, garnet	Kfs/AB ~1
Colombo-tantalite	dyke	Interior near the border	Quartz, potassium feldspar, muscovite, albite, colombo-tantalite, garnet	Kfs/AB ~ 1
Spodumene	dyke	Primarily at the exterior ≤ 3 km from contact	Quartz, albite, potassium feldspar, greenish muscovite, spodumene, garnet, tourmaline	Kfs/Ab < 1 Except for dyke at Lac des Hauteurs showing (Kfs/Ab > 1)

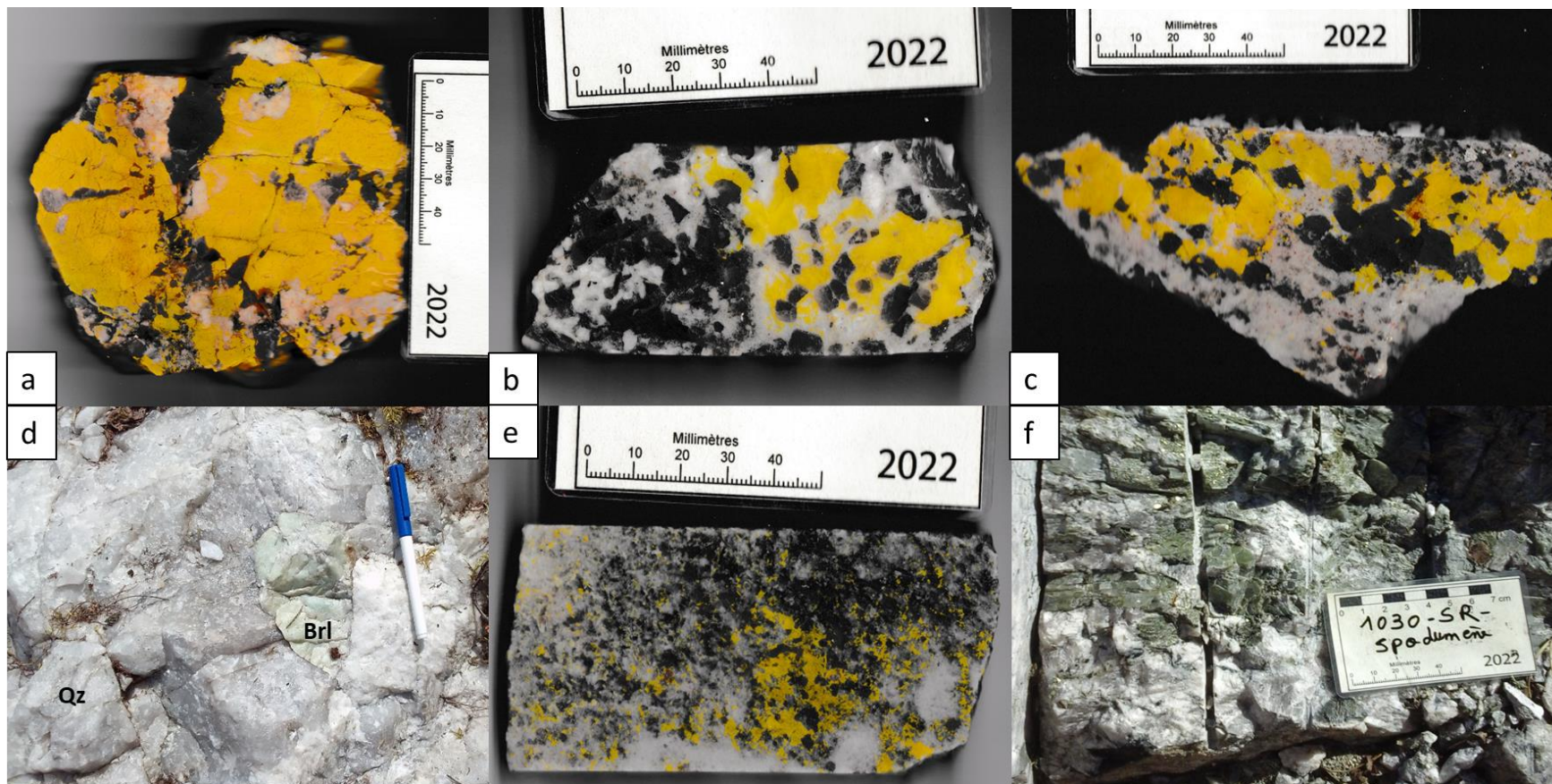


Figure 4.8. Photos of pegmatite samples. Photos a, b, c, and e underwent potassium feldspar staining with sodium cobaltinitrite. Potassium feldspar in yellow, plagioclase in white/pink. a) Barren pegmatite. Sample 22-SR-1017A. b) Beryl pegmatite. Sample 22-SR-1079A. c) Colombo-tantalite pegmatite. Sample 22-SR-1047A. d) A photo of a bluish-green beryl crystal. Sample 2022-SR-1013A. e) Spodumene pegmatite. Sample 22-SR-1073A. f) Outcrop of the Authier deposit showing green-hued spodumenes. Outcrop 22-SR-1030. Abbreviations: Ab = albite, Brl= beryl, Co Ta = colombo-tantalite, Grt = garnet, Ms = muscovite, Or = orthoclase, PR = perthite, Qz = quartz.

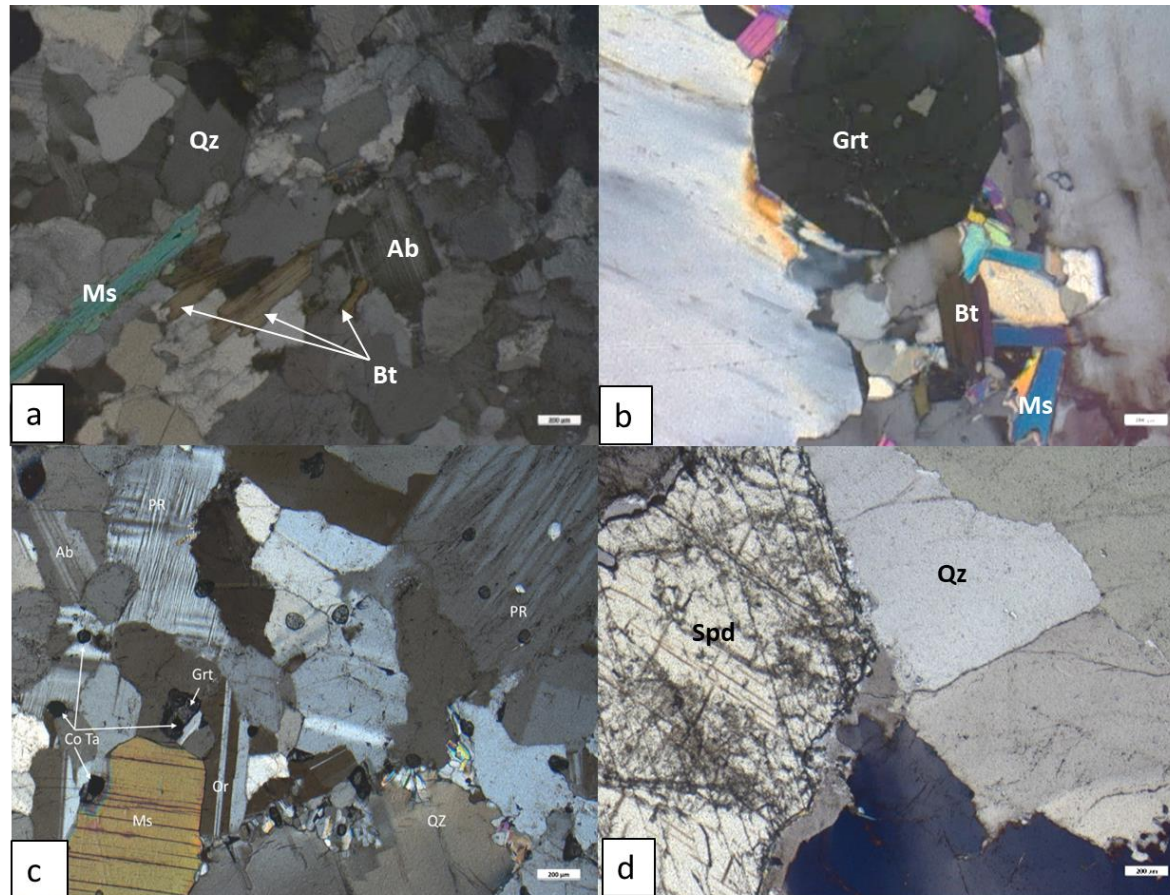


Figure 4.9. Photomicrographs of pegmatites. a) Barren pegmatite containing biotites. Sample 22-SR-1068A. b) Garnet grain in a barren pegmatite. Sample 22-SR-1062A. c) Microphotograph of colombo-tantalite pegmatite showing the fine granularity of these minerals. Sample 22-SR-1047A. d) Spodumene with a fresh crystalline texture. Sample 22-SR-1023A. Abbreviations: Ab = albite, Bt = biotite, Co Ta = colombo-tantalite, Grt = garnet, Ms = muscovite, Or = orthoclase, PR = perthite, Qz = quartz, Spd = spodumene. Scalebar 200µm.

4.7.2 Geochemical Characteristics

4.7.2.1 LMB Granites

Geochemical analyses from the LMB samples show elevated values of SiO_2 compared to the early diorite to granodiorite phase. The SiO_2/CaO ratio was used on the X-axis to mitigate the closure effect at 100% of the oxides and to spread out the analyses for granites and pegmatites since they have very similar SiO_2 contents. CaO is used as the denominator because it is inversely proportional to SiO_2 and has a very good correlation coefficient with SiO_2 ($r^2=0.85$). Thus, a high SiO_2/CaO ratio indicates an analysis from a more evolved sample versus a lower ratio. The SiO_2/CaO ratio discriminates effectively granite from pegmatite samples and is thus more effective than SiO_2 alone. Only certain elements are presented in Figures 4.10 and 4.11 to illustrate the relationships between the different rock types. For full compositional attributes of the LMB granites, the reader is referred to Table 4.3.

Upon detailed examination of the geochemistry of the granitic rocks (Table 4.3), some elements tend to systematically increase (SiO_2 , Rb, Li, Be) or decrease (CaO, Ba, Sr, Zr, H, certain REE) from biotite to muscovite granite. However large variations of concentrations within the three phases of granite does not permit notable distinction contrary to what was observed by Boily (1995) within the PLCPS as a whole and Mulja et al. (1995a) for the LMB (Figures 4.10 and 4.11). However, samples from the early phase of the LMB (diorite to granodiorite) show a chemical distinction from the late phase monzogranites. Furthermore, analyses of both phases of the LMB suggest a common trend on these modified Harker diagrams.

The analyzed rocks range from intermediate composition (early phase) ($63.18\% < \text{SiO}_2 < 63.96\%$) to felsic (late phase) ($71.62\% < \text{SiO}_2 < 76.77\%$). With a low SiO_2/CaO ratio, the early phase samples exhibit high concentrations of Al_2O_3 , MgO, and TiO_2 . $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{T})}$ shows considerable dispersion for samples with a low SiO_2/CaO ratio. As the SiO_2/CaO ratio increases, K_2O also increases. Na_2O reveals modest variability showing a slight decrease through the evolutionary sequence of the granitic facies. Trace element data unveil a clear correlation with the SiO_2/CaO ratio throughout the evolution of the granitic facies. Sr, Zr,

and Th decrease with an increasing SiO_2/CaO ratio, whereas Rb, Nb, and Ta increase (Figure 4.11).

Tableau 4.3. Average composition of the three facies of LMB granites. Abbreviations: I1B-Bt = biotite granite, I1B-Bt-MS = Biotite-muscovite granite, I1B-Ms = muscovite granite. n = number of samples, s = Standard Deviation, x = Mean.

Rock	I1B-Bt (n = 12)		I1B-Bt-Ms (n = 3)		I1B-Ms (n = 6)	
	Major element oxides (wt. %)		Major element oxides (wt. %)		Major element oxides (wt. %)	
	x	s	x	s	x	s
SiO ₂	73,82	0,96	73,87	0,75	74,53	1,07
TiO ₂	0,06	0,16	0,05	0,02	0,04	0,05
Al ₂ O ₃	14,41	0,98	14,36	0,31	14,50	0,48
Fe ₂ O ₃ (T)	1,23	0,86	1,37	0,22	1,25	0,20
MnO	0,03	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01
MgO	0,14	0,50	0,13	0,04	0,10	0,07
CaO	0,89	1,00	0,78	0,17	0,67	0,33
Na ₂ O	4,34	0,65	3,92	0,53	4,42	0,77
K ₂ O	3,80	1,20	4,24	0,82	3,35	1,21
P ₂ O ₅	0,04	0,06	0,04	0,03	0,05	0,03
Trace elements (ppm)			Trace elements (ppm)		Trace elements (ppm)	
Ba	411,5	335,51	279,33	162,59	136,08	274,57
Rb	336,25	89,76	352,66	172,66	508,50	179,47
Sr	162,75	373,36	77,00	29,06	44,83	238,32
Zr	56,33	46,74	55,66	18,23	40,83	21,15
Nb	13,04	5,80	12,43	4,85	18,80	5,68
Y	16,21	9,53	11,36	11,82	16,70	10,79
Ta	3,23	1,61	3,08	4,91	7,33	4,23
Hf	2,31	1,01	2,26	0,47	1,88	0,53
Th	16,65	7,24	17,00	4,81	12,05	6,66
Li	138,58	72,40	188,00	125,72	242,66	110,23
Be	4,16	1,85	4,33	9,60	11,33	7,95
Rare earth elements (ppm)			Rare earth elements (ppm)		Rare earth elements (ppm)	
La	15,87	9,14	16,93	6,39	11,57	6,93
Ce	30,09	17,72	33,23	10,32	22,21	11,82
Pr	3,38	2,11	3,51	1,04	2,49	1,21
Nd	12,40	8,00	11,76	2,63	9,07	3,68
Sm	2,70	1,38	2,60	0,60	2,29	0,77
Eu	0,32	0,41	0,25	0,06	0,16	0,09
Gd	2,59	1,12	2,01	1,21	2,13	1,16
Tb	0,45	0,20	0,32	0,25	0,40	0,24
Dy	2,72	1,47	1,93	1,81	2,68	1,67
Ho	0,53	0,34	0,34	0,42	0,51	0,38
Er	1,59	1,06	1,01	1,26	1,53	1,14
Tm	0,24	0,15	0,15	0,18	0,23	0,17
Yb	1,62	1,04	1,06	1,20	1,66	1,11
Lu	0,25	0,15	0,17	0,18	0,26	0,17
ΣREE	74,75		75,27		57,19	
K/Rb	94,80	38,40	102,00	25,31	62,30	28,10
K/CS	2106,60	1508,92	1471,49	1054,16	1491,44	995,75
Nb/Ta	4,91	3,08	4,15	1,36	3,70	2,78
Zr/Hf	23,75	6,36	24,56	4,24	21,30	4,83
Mg/Li	7,22	30,01	4,77	2,28	3,63	2,55

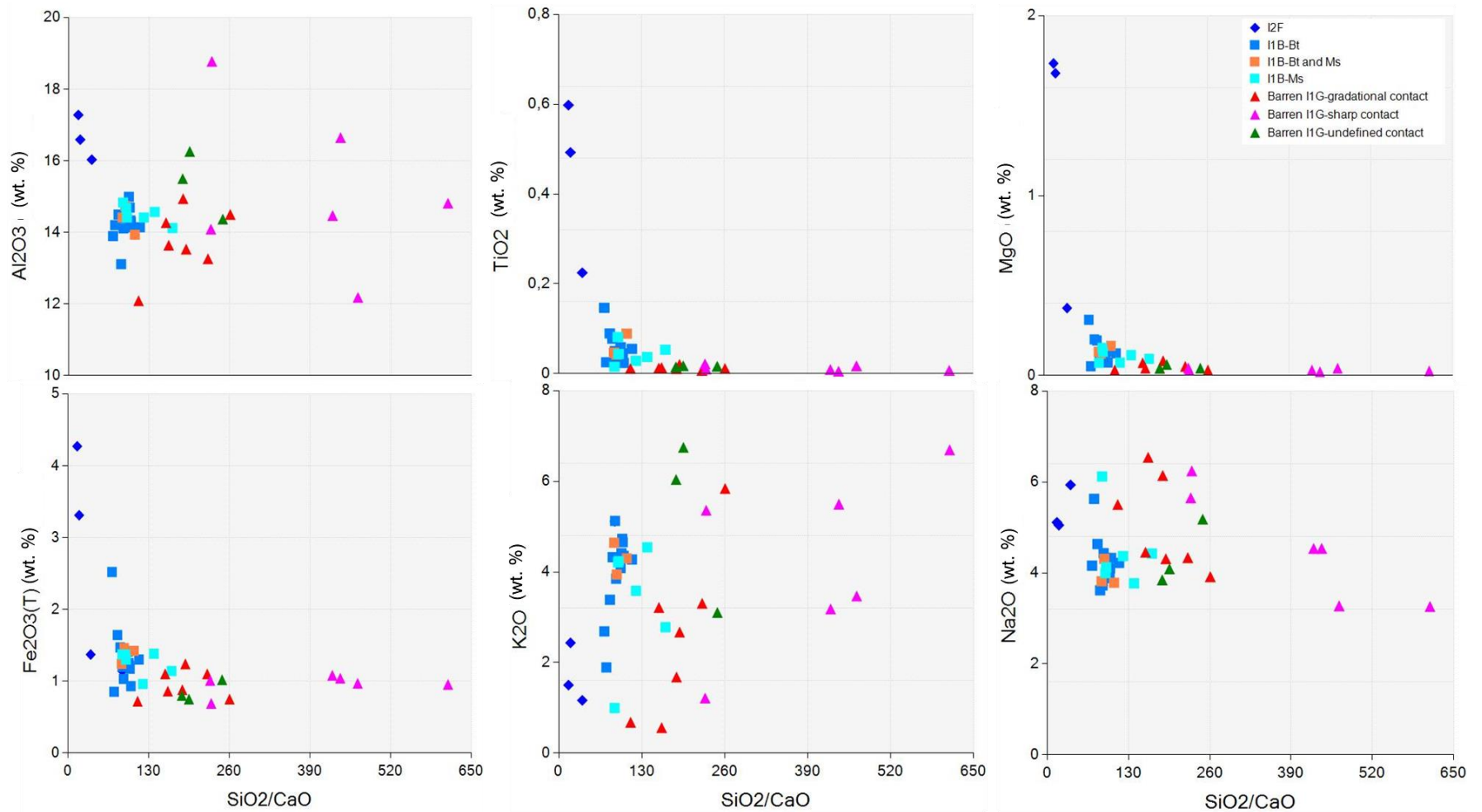


Figure 4.10. Bivariate diagrams of major elements (Al₂O₃, TiO₂, MgO, Fe₂O_{3(T)}, K₂O, and Na₂O) relative to the SiO₂/CaO in the LMB. Abbreviations: Bt = biotite, I1B = late LMB phase, I1G = pegmatite, I2F = early LMB phase, Ms = muscovite.

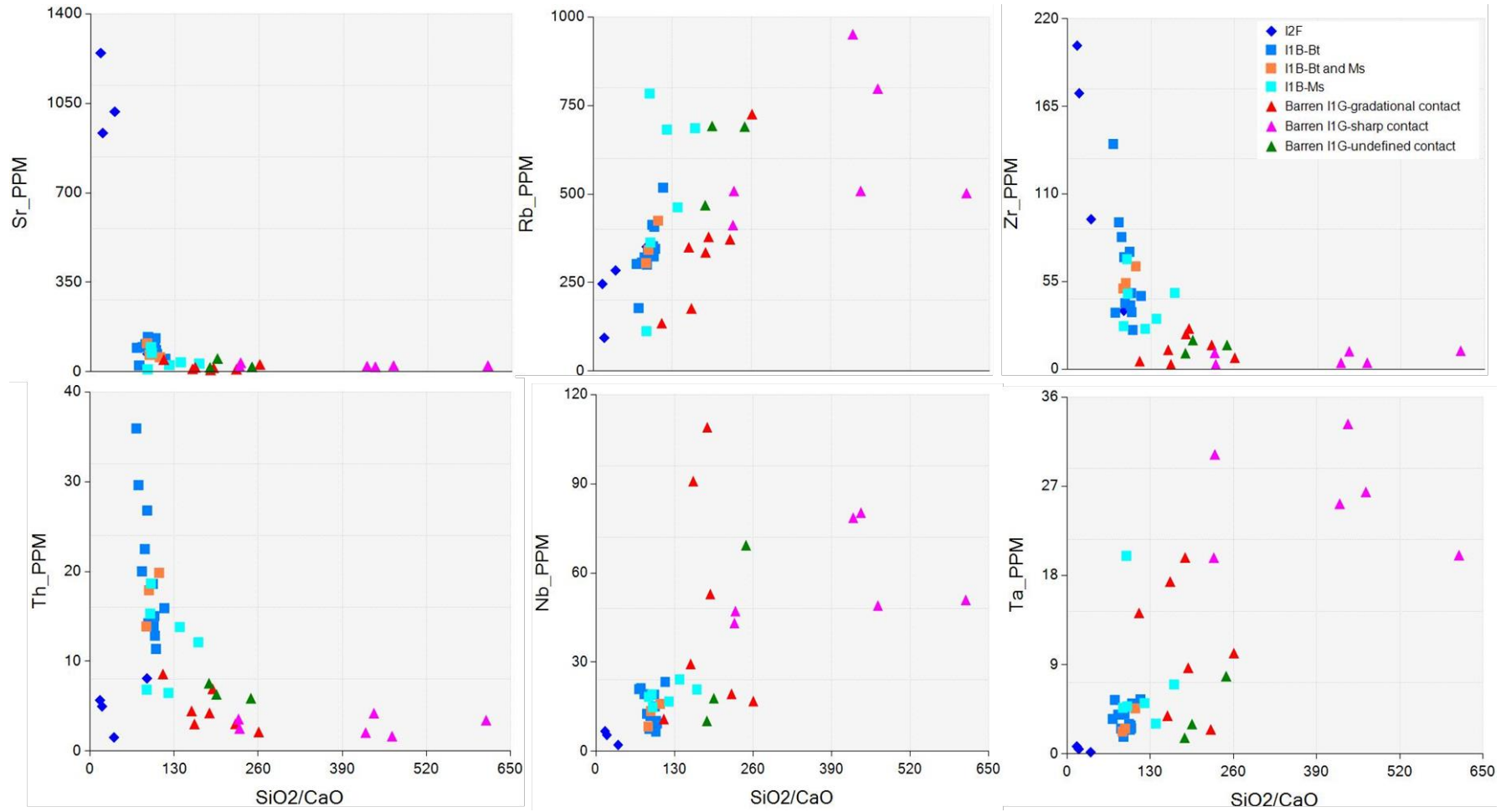


Figure 4.11. Bivariate diagrams of trace element contents (Sr, Rb, Zr, Th, Nb, and Ta) relative to SiO_2/CaO ratio from the BLM. Abbreviations as in Figure 4.10.

4.7.2.2 LMB pegmatites

The chemical composition of LMB pegmatites does not enable the distinction of the four main families (barren, beryl, colombo-tantalite, and spodumene) of pegmatites as clearly as their mineralogical attributes. The main reason for this is the heterogeneous distribution of the marker minerals (beryl, colombo-tantalite and spodumene) within the pegmatite dykes which does not allow distinctive chemical enrichments to be systematically noted.

Spodumene pegmatites are usually enriched in lithium and rubidium whereas pegmatites from the other families tend to have similar chemical composition and therefore do not show any chemical distinction between them. The chemical attributes of the four pegmatite families are detailed in Table 4.4.

Figures 4.10 and 4.11 indicate that for the SiO_2/CaO ratio, the barren pegmatites with gradational contacts are intermediate between monzogranites and barren pegmatites with sharp contacts, whereas the compositions of other elements are similar between the two types of barren pegmatites. Figure 4.12 shows that pegmatites from different families exhibit relatively uniform and low concentrations of Al_2O_3 , TiO_2 , and MgO , regardless of the SiO_2/CaO ratio. The $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{T})}$ values also remain quite homogeneous among these samples. However, some dykes show higher K_2O and Na_2O contents, notably Na_2O , which is particularly enriched at medium SiO_2/CaO ratios. Figure 4.13 shows that the trace element concentrations also change with the SiO_2/CaO ratio. A decrease in Sr and Th concentration is noted with an increasing SiO_2/CaO ratio, whereas Rb, Nb, and Ta increase. Beryl and colombo-tantalite dykes exhibit higher concentrations of Nb and Ta at intermediate SiO_2/CaO ratios.

Tableau 4.4. Chemical characteristics of the four families of pegmatites from the LMB sector and Boily et al. (1989) samples.

Pegmatite	n	Oxide concentration (wt. %)				Trace elements (ppm)							
		SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	CaO	MgO	Cs	Rb	Nb	Ta	Hf	Zr	Be	Li
Barren	18 (2)	67-79	1,06 – 2,05	0,12 – 0,70	0,02 - 0,29	1 - 69	3 - 954	10 -109	2 -94	0,2 -3,4	3 - 25	2 -135	19 - 293
Beryl	3 (3)	71-78	1,00 - 1,45	0,11 - 0,27	0,03 - 0,23	19 -50	540 -1008	23 -130	13 -32	0,4 - 2,4	4 - 18	4 - 220	50 - 513
Colombo-tantalite	2 (1)	73,7-73,8	0,01 – 0,54	0,22-0,25	0,05 - 0,10	3 - 47	31 - 1100	38 -51,7	5 - 28	1,5 - 14,1	15 -86	7-9	9 - 255
Spodumene	3* (4)	66 -77	0,26 - 1,69	0,14 - 0,22	0,03 - 0,08	46 -168	424- 1300	17 -116	34 - 85	2,8 -25,6	14 -98	10-154	5231 - 13000

n = number of samples from this study; samples from Boily et al. (1989) in parentheses

* - Although 7 samples were taken from the Authier site during this study, only the average of these is used in this table.

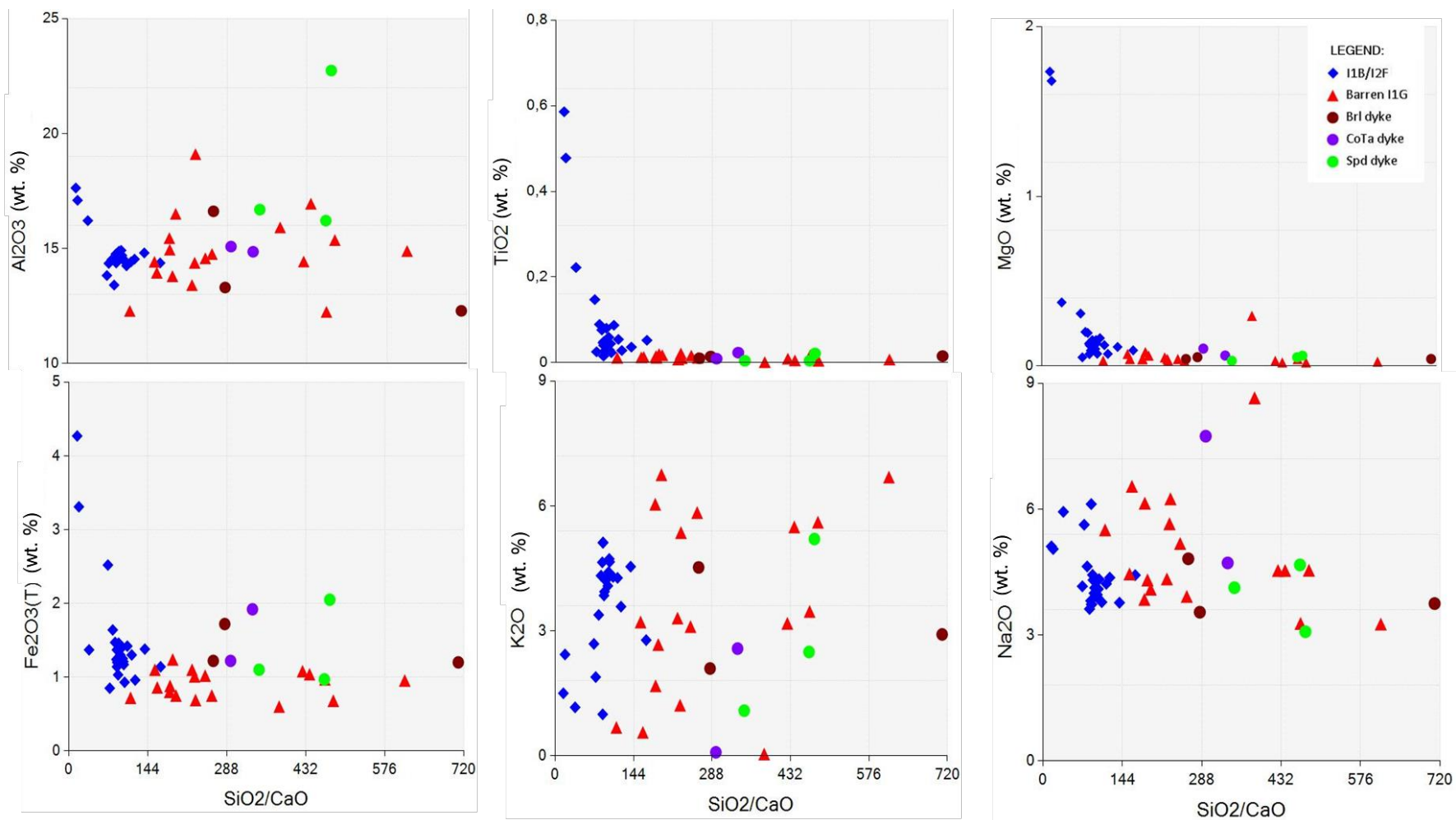


Figure 4.12. Variation of oxide concentrations as a function of the SiO_2/CaO ratio for pegmatitic samples from the LMB. Abbreviations: Brl = beryl, CoTa = colombo-tantalite, I1B/I2F = LMB, I1G = pegmatite, Spd = spodumene.

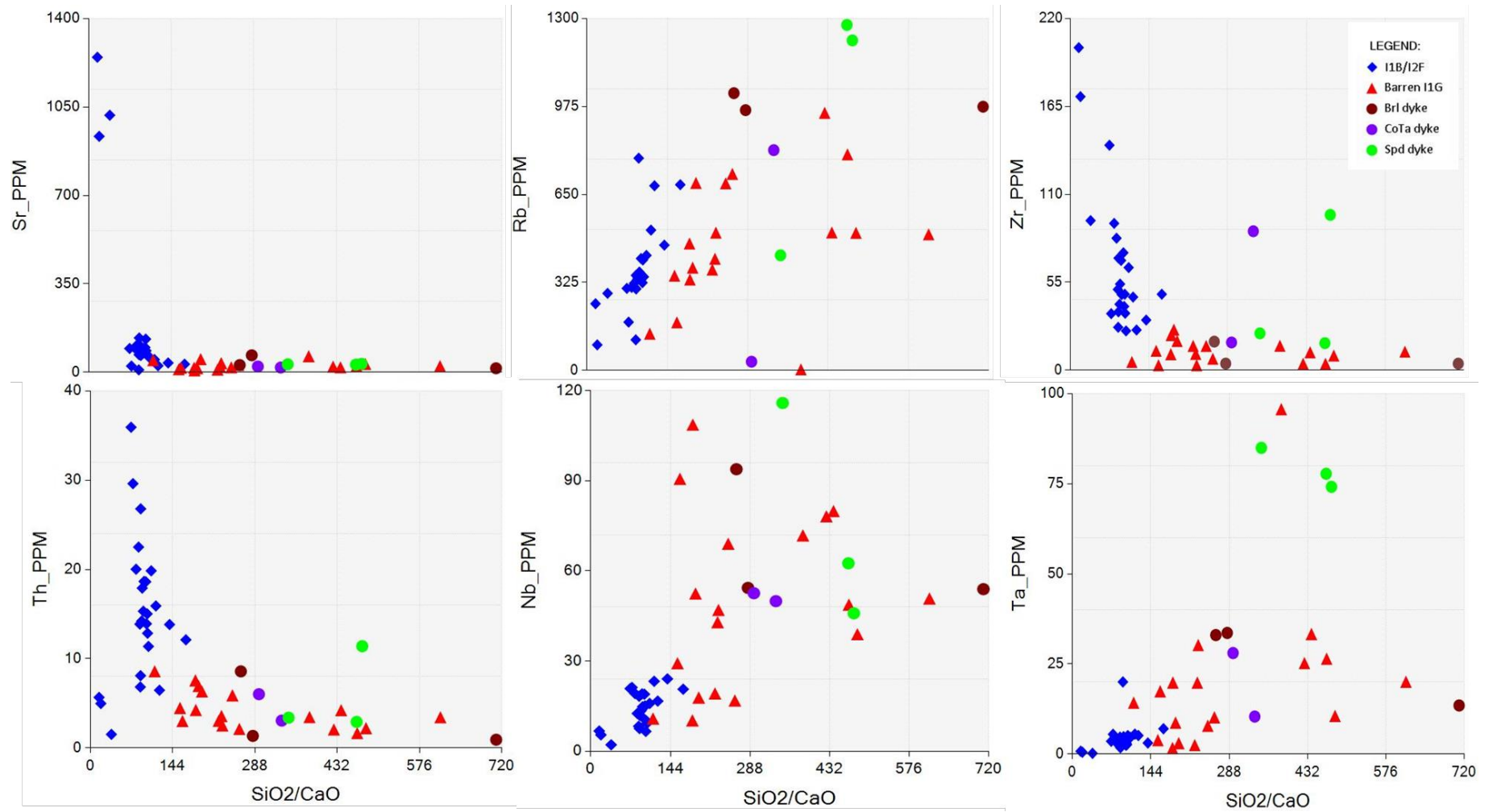


Figure 4.13. Correlation between the SiO_2/CaO ratio and trace element contents for the pegmatitic families of the LMB. Abbreviations as in Figure 4.12.

4.7.2.2. 1 Chemical fractionation ratios

Figure 4.14 displays the K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf ratios against the SiO_2/CaO ratio. These ratios are commonly used to assess the degree of fractionation in pegmatite dykes with the lowest values indicating the highest fractionation (Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019). Generally, it is observed that barren pegmatites exhibit the highest ratios, and spodumene dykes possess the lowest ratio values suggesting a higher level of magmatic fractionation compared to other types of pegmatites as originally proposed by Cerny et al. (1985). However, an exception is noted with sample 2022-SR-1043A, corresponding to the spodumene dyke within the LMB (Lac des Hauteurs showing). While following the general trend of spodumene dykes in terms of low fractionation ratio values, this sample stands out by showing a higher K/Rb ratio.

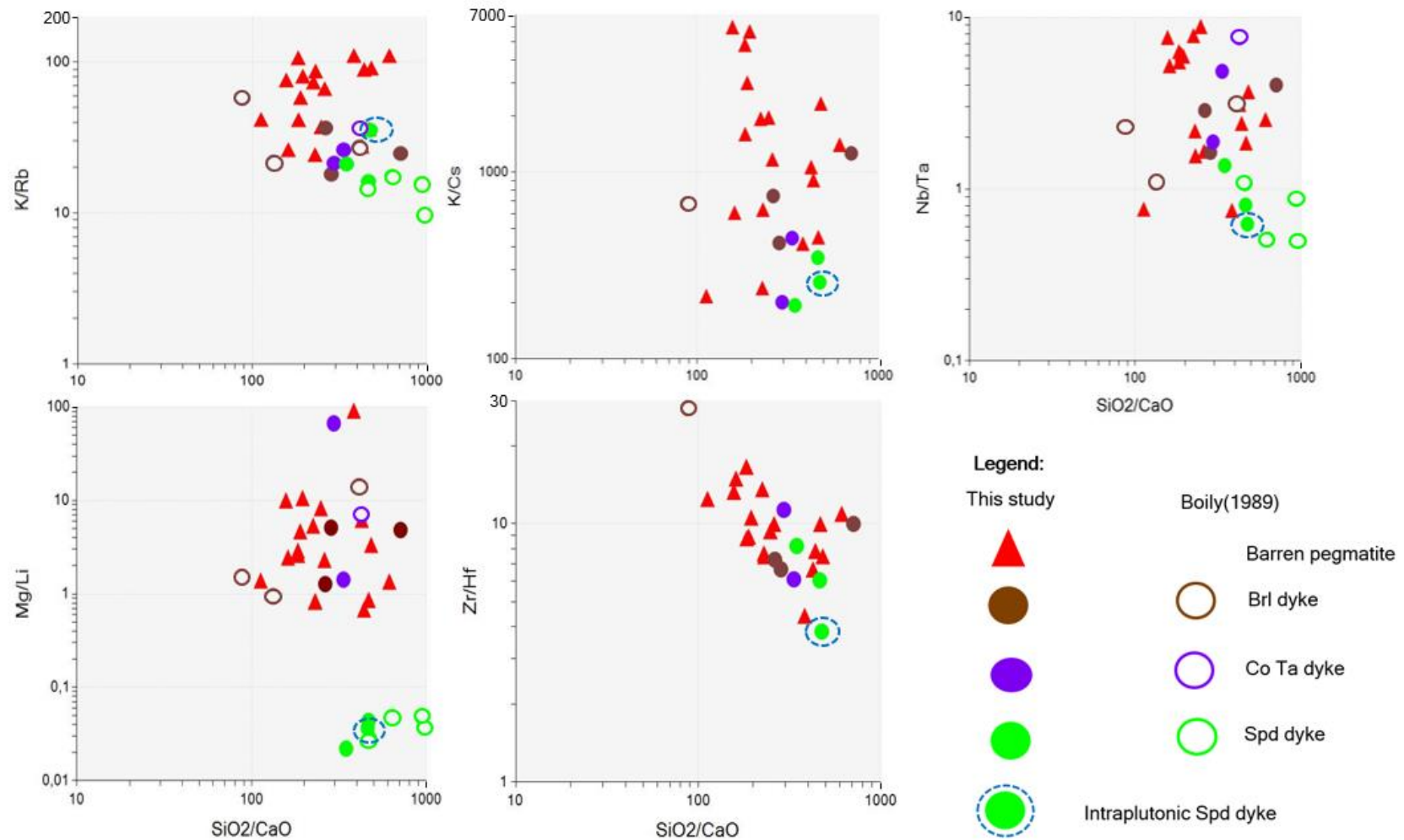


Figure 4.14. Comparison of ratios of generally incompatible elements in LMB pegmatites. Spodumene pegmatites are the most distinctive with the lowest K/Rb and Mg/Li ratios, except for the intraplutonic dyke. Abbreviations: Brl = beryl, CoTa = columbo-tantalite, Spd = spodumene.

4.7.3 Mineral analysis

The studies by Cerny et al. (1985) and Breaks et al. (2003, 2005) have indicated that the K/Rb ratio in muscovites and potassium feldspars is also highly effective in identifying highly fractionated spodumene dykes. They have also demonstrated that the Fe/Mn ratio in garnets and colombo-tantalites is robust in also identifying these dykes. In this study, grains of muscovite, potassium feldspar, colombo-tantalite, and garnet from different pegmatite families were analyzed.

4.7.3.1 Muscovite

The examination of the different pegmatite families reveals interesting chemical composition differences reflected by the K/Rb and K/Cs ratios, as well as the concentrations of Na, Ta, and Rb in muscovites. The following table (Table 4.5) presents the averages of measurements performed on muscovites from selected samples, ranging from barren pegmatites to spodumene dykes. The spodumene dyke samples show the lowest K/Rb ratios with an average of 18. Our measurements of muscovites show Rb values similar to those observed by Mulja et al. (1995b) for the mineralized pegmatites of the LMB (Rb = 4620 – 9040 ppm; n=4), but the Ta values are much lower (Ta = 44 – 103 ppm; n=3). It is important to note that the decrease in the K/Rb ratio is uniform from barren to spodumene pegmatites (mainly associated with the increase in Rb), whereas the K/Cs ratio is not as conclusive, likely due to lower Cs values approaching the detection limit (Cs₂O ~ 180 ppm). It is also noted that muscovites become enriched in Na but contain less Ta in the colombo-tantalite and spodumene dykes.

Tableau 4.5. Averages of measurements conducted on muscovites from selected samples. Abbreviations: Brl=beryl, Co Ta=colombo-tantalite, Spd=spodumene. (-) indicates absence of data.

Pegmatite	Sample	K/Rb	K/Cs	Na (ppm)	Ta(ppm)	Rb(ppm)
Barren	3 (15 analyses)	135	-	2243,8	1228,5	935,7
Brl	2 (10 analyses)	36	142	2889,5	642,9	2985,7
Co Ta	2 (10 analyses)	20	-	5876,1	696,2	4045,5
Spd	3 (15 analyses)	18	176	3628,1	720,7	5555,4

- some measurements of Cs were below the detection threshold; therefore, the K/Cs ratio is not given.

When comparing the K/Rb ratio of muscovites with that of the whole rock, it is observed that the measurements done on the mineralized pegmatites are close to the 1:1 line (Figure 4.15). However, the K/Rb ratios of muscovites for the barren pegmatites are significantly higher than the K/Rb ratios of the whole rock. The ratios observed in these muscovites are similar to those of barren pegmatites from Breaks et al. (2003).

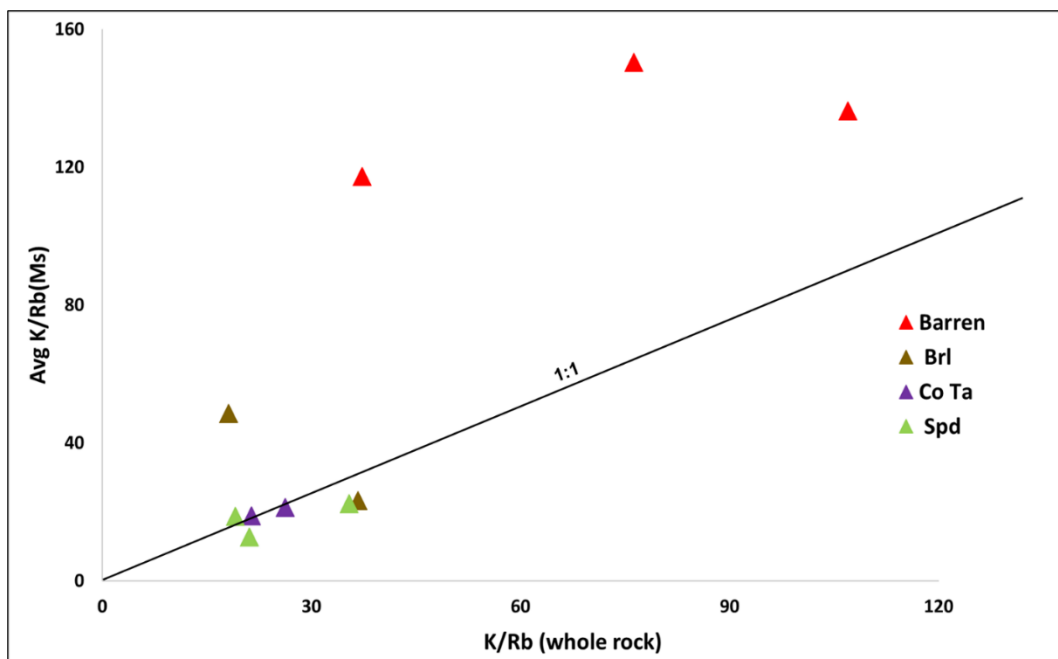


Figure 4.15. Plot comparing the K/Rb ratio of muscovites (Ms) versus the K/Rb ratio of whole rock analyses from barren pegmatites to spodumene dykes. Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene.

4.7.3.2 K-feldspar

The following table (Table 4.6) displays the results of analyses on potassium feldspar from different pegmatite families. The barren pegmatites exhibit the highest K/Rb ratio, whereas the spodumene pegmatites show the lowest ratio. This variation is similar to that observed in muscovites as Rb concentrations is mostly responsible for the K/Rb ratio variations. Within the same pegmatite family, the K/Rb ratio for muscovites is consistently lower than that of potassium feldspars, which is also systematically observed in pegmatites elsewhere (Cerny et al., 1985; Breaks et al., 2003). The K/Cs ratio does not show a notable variation across the pegmatite families. The sodium concentration decreases, and the concentrations of Cs and Rb for potassium feldspars systematically increase from barren to spodumene pegmatites. Mulja et al. (1995a) did not analyse Rb and Cs concentrations in K-feldspars.

Tableau 4.6. Averages of measurements conducted on potassium feldspar from selected samples for the four families of pegmatite. Abbreviations: Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene. (-) indicates absence of data.

Pegmatite	Sample	K/Rb	K/Cs	Cs(ppm)	Na (ppm)	Rb (ppm)
Barren	3 (15 analyses)	153,4	556,0	283,0	3310,1	1136,8
Brl	2 (10 analyses)	54,4	450,0	306,6	2563,1	2825,3
Co Ta	1 (5 analyses)	32,5	-	-	2491,1	4109,2
Spd	3 (16 analyses)	31,2	506,9	388,7	1905,2	4606,6

Figure 4.16 compares the average K/Rb ratios in potassium feldspars with the K/Rb ratio of the whole rock for the four pegmatite families. As observed in the case of muscovites, the K/Rb ratios of potassium feldspars are similar to the K/Rb ratios of the whole rock for mineralized pegmatites. Also, potassium feldspars from barren pegmatites exhibit a K/Rb ratio that is significantly higher than the K/Rb ratio of the whole rock. The ratios observed in these K-feldspars are similar to those of barren pegmatites from Breaks et al. (2003).

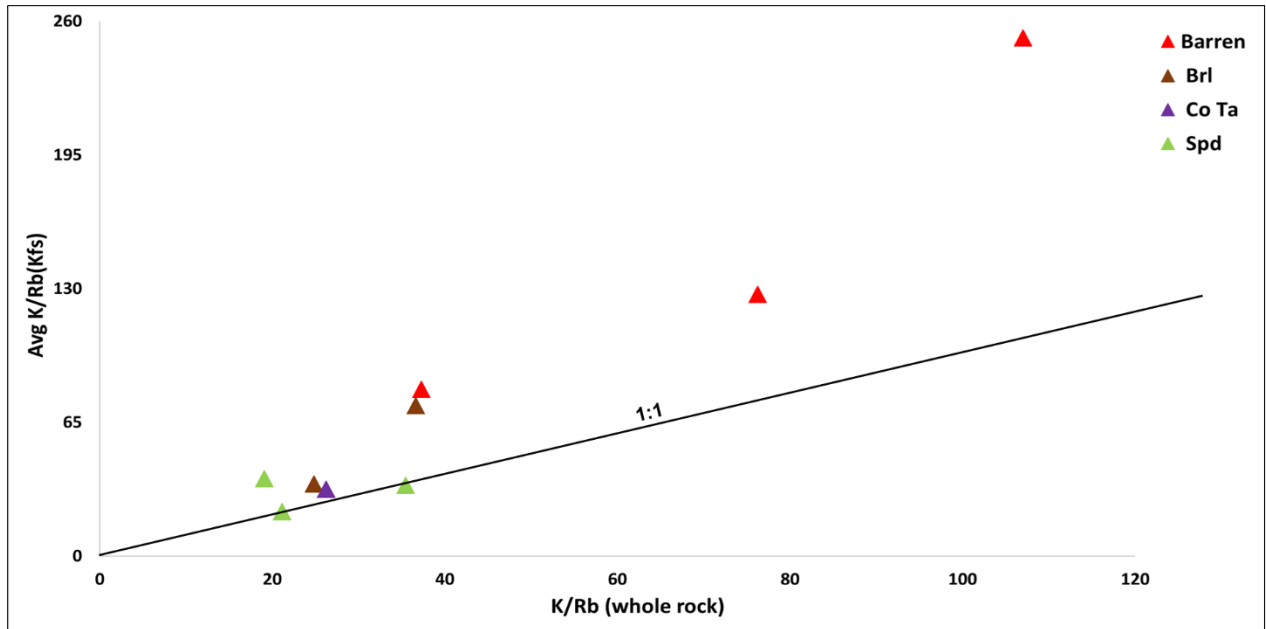


Figure 4.16. Plot of K/Rb ratios of potassium feldspars (Kfs) versus those of the whole rock in the four pegmatitic families. Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene.

4.7.3.3 Colombo-tantalite

The plot shown in Figure 4.17 displays the average chemical ratios of $Ta/(Ta+Nb)$ and $Mn/(Mn+Fe)$ in colombo-tantalite from barren, beryl, colombo-tantalite, and spodumene pegmatites for this study. Data from Mulja et al. (1996) are also included for comparison. The results of our analyses indicate that the samples have similar $Mn/(Mn+Fe)$ ratios across the four pegmatite families (0,23 – 0,39), but there is an increase in the $Ta/(Ta+Nb)$ ratio (from $< 0,18$ to 0,37) in the colombo-tantalites from the spodumene pegmatites. It is also noted that the colombo-tantalites from the barren, beryl, and colombo-tantalite pegmatites in this study show compositions similar to the beryl and spodumene-beryl pegmatites of Mulja et al. (1996). However, the colombo-tantalites from the spodumene pegmatites of Mulja et al. (1996) generally exhibit higher $Ta/(Ta+Nb)$ and $Mn/(Mn+Fe)$ ratios than those measured in this study. The colombo-tantalites from the LCT pegmatites in the Lake Simard sector, approximately 90 km to the SSW of the study area, show similar $Ta/(Ta+Nb)$ ratios to our colombo-tantalites, but the $Mn/(Mn+Fe)$ ratios are much higher ($> 0,6$) (Legault, 2023b).

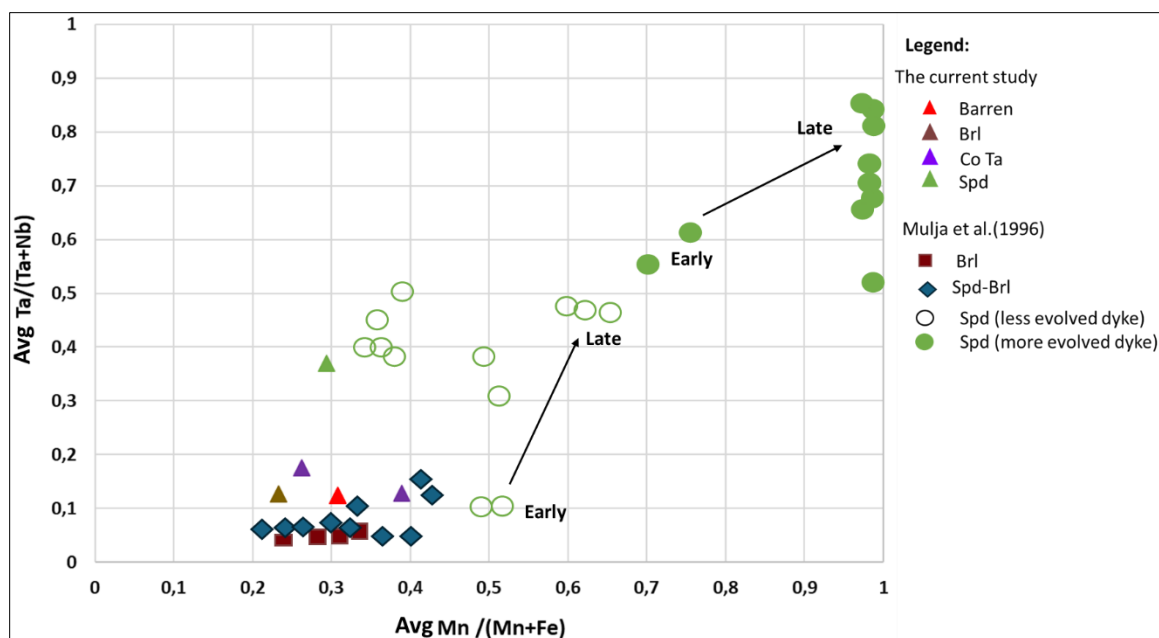


Figure 4.17. Graph of the average Ta/(Ta+Nb) ratio versus the average Mn/(Mn+Fe) ratio for columbo-tantalite analyses from this study. Data from Mulja et al. (1996) are presented for comparison. The arrows indicate the compositional change from early columbo-tantalite (dyke border) to late (dyke center) (Mulja et al., 1996). Abbreviations: Avg=average, Brl=beryl, CoTa=columbo-tantalite, Spd=spodumene.

4.7.3.4 Garnet

Figure 4.18 displays a distribution of garnet analyses based on their magnesium content (Mg in ppm) and their $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratio. The rationale behind this plot is based on the transition from almandine garnet, typical of barren pegmatites, to spessartine garnet, which is more characteristic of spodumene dykes (Breaks et al., 2003). Almandine is iron-rich ($\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+}) < 0.5$) while spessartine is manganese-rich ($\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+}) > 0.5$).

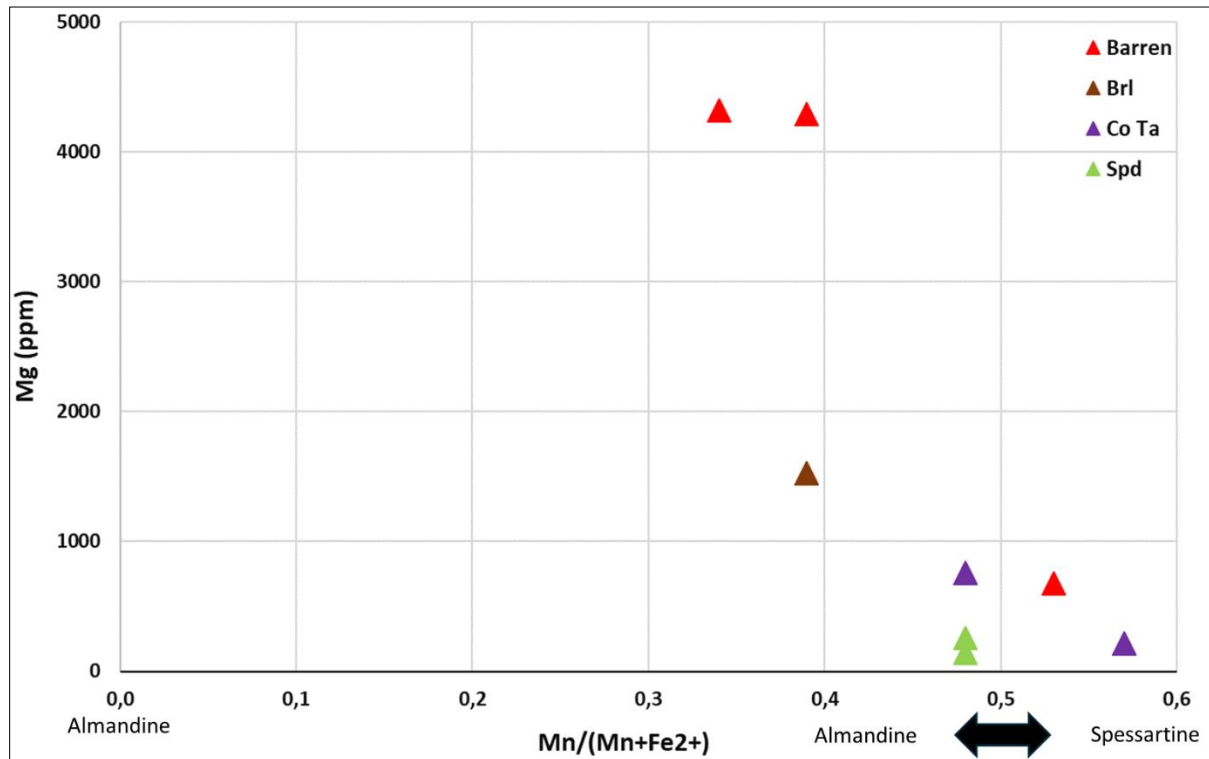


Figure 4.18. Graph displaying the concentration of Mg (ppm) as a function of the $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratio in garnets for barren pegmatites (Barren), beryl dykes (Brl), colombo-tantalite dykes (CoTa), and spodumene dykes (Spd). The diagram is inspired by Breaks et al. (2003).

The graph indicates that the highest magnesium contents and the lowest $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratios are associated with barren and beryl pegmatites, whereas colombo-tantalite and spodumene pegmatites show very low magnesium concentrations and higher $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratios (Figure 4.18). The low $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratios of the barren pegmatites are similar to those obtained for the two-mica granite facies of the LMB by Mulja et al. (1995a) (0,32-0,38) and the ratio obtained by them on a spodumene pegmatite associated

with the La Corne Batholith (0,56) is similar to those obtained on the spodumene pegmatite family here. As in the case of colombo-tantalites, the garnet analyses of this study show lower $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}^{2+})$ ratios compared to the garnets from Lake Simard (0,7) (Legault, 2023b).

4.8 Discussion

In this project, a study of the geological, mineralogical, and geochemical characteristics of the LMB sector pegmatites in the Abitibi Subprovince was conducted, highlighting a well-known region for critical and strategic minerals, especially lithium.

Within the fine-to-coarse-grained facies of the LMB, three distinct facies are noted in the granites (biotite, biotite-muscovite, and muscovite), but chemically, no notable difference between them is observed (Figures 4.10 and 4.11). However, the early phase of the LMB (diorite to granodiorite) presents typical chemical characteristics, including a lower SiO₂ content and higher compatible elements (e.g., Fe₂O_{3(T)}, MgO, and TiO₂). They also show high levels of Al₂O₃, Sr, and Zr, as well as lower values in Rb, Nb, Ta, and Th. On the other hand, the pegmatite dykes follow the same trend defined by the early and late phases of the LMB (including gradational contact pegmatites) and thus would likely be the most differentiated rocks of this magmatic suite with a higher SiO₂/CaO ratio than that of the granites. Chemically, within the mineralized pegmatites, it is noted that the spodumene dykes are the most fractionated and characterized by an enrichment in Rb, Nb, and Ta, and a decrease in Sr, Th, and Zr (Figures 4.12 and 4.13).

These observations suggest a comagmatic origin between the LMB and the mineralized pegmatites. However, available geochronologic data indicate a significant age difference between spodumene pegmatites (2632 +/- 5 Ma; Davis, 2023) and the granitic phase of the BLM (2641 +/- 2 to 2647 +/- 2 Ma; Machado et al., 1991; Ducharme et al., 1997). This age difference of 2-16 Ma between the LMB and Li mineralization is similar to gaps of approximately 10 Ma estimated between emplacement of peraluminous granites and W-Sn mineralization in South China (see Zeng et al., 2008 for references). The dating by Machado et al. (1991) and Ducharme et al. (1997) was performed on samples taken from the borders of the LMB and therefore may not represent the youngest age of the LMB which exhibits mineralogical and geochemical heterogeneity (Dawson, 1966; Boily et al., 1989; Boily, 1992, 1995; Mulja et al., 1995a, 1995b).

It is also possible that a magmatic event related to the partial melting of the LMB at depth occurred consistently with the model proposed by Koopmans (2023) and explains this age difference.

The geochemical and mineralogical analyses have revealed the diversity of LMB pegmatites ranging from barren pods to spodumene-bearing dykes. It was also observed that spodumene pegmatites represent the most fractionated dykes with low ratios of K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf (Table 4.7) which is comparable to previous studies (Cerny, 1991b; Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005). These ratios thus allow for the identification of dykes with high lithium potential even if spodumene is not observed. The K/Rb ratio is the preferred metallogenetic indicator for use with SIGEOM database because these two elements are the most common compared to other ratios (Table 4.8).

Although compilation of available geochemical data can identify potential spodumene pegmatite, the use of portable chemical analysis techniques, such as portable X-ray fluorescence (pXRF) and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), is highly recommended in the field. Although microprobe analyses on muscovite and K-feldspars from the spodumene pegmatites showed similar K/Rb ratios to those from whole rock analyses, these ratios were quite distinctive in barren pegmatites. The elevated K/Rb ratios in muscovite and K-feldspar from barren pegmatites compared to whole rock analyses indicates the possible presence of a rubidium-rich mineral phase in these pegmatites that was not identified. The portable chemical analysis methods are particularly suitable for pegmatites due to their large crystals, allowing for direct mineral analyses. Our observations from thin sections indicate that muscovite is typically fresh, whereas potassium feldspars can be altered. However, these feldspars are usually much larger than the muscovites. Conducting spot analyses on muscovite and K-feldspars crystals should yield similar results. However, these measurements should not be combined as K/Rb ratios of muscovite are systematically lower than those of K-feldspar. These approaches which are currently being employed by some exploration companies could contribute to the improvement of the prospecting process and the exploration of critical and strategic mineral resources, especially lithium.

Tableau 4.7. Summary of the averages of the K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf ratios of different families of pegmatites in the study area according to our data and those of Boily et al. (1989). Limits Spd: lower limits for spodumene pegmatites according to compilation by Legault (2023a). Abbreviations: Brl=beryl, CoTa=colombo-tantalite, Spd=spodumene.

	Pegmatite	Barren	Brl	CoTa	Spd	Limits Spd
	n	20	6	3	7	
Average	K/Rb	69	31	28	18	20
	K/Cs	2361	802	323	271	400
	Nb/Ta	4,61	2,98	4,77	0,83	1,65
	Mg/Li	8,72	4,68	25,15	0,04	1,00
	Zr/Hf	10,7	9,3	8,7	4,1	8,0

Tableau 4.8. Calculated ratios relative to the total number of analyses compiled for granites and pegmatites in the SIGEOM.

		Number of calculated ratios / Total number of analyses				
Rock	Total number of analyses	K/Rb	K/Cs	Nb/Ta	Mg/Li	Zr/Hf
Granite	154	153	44	45	136	44
Pegmatite	43	41	30	40	39	30

4.8.1 Identification of dykes with high potential for lithium mineralization discovery

Using data from this study in conjunction with those from the SIGEOM database, it is possible to establish a potential map for the LMB sector. The compilation of chemical ratios presented in Table 4.7 indicates that spodumene pegmatites show values lower than the threshold values proposed by previous studies of Cerny (1991), Breaks et al. (2005), Selway et al. (2005), Ballouard et al. (2016), and Legault (2023a). This compilation, coupled with the data from Table 4.8, led us to develop a potential map based on the K/Rb ratio of the whole rock (Figure 4.19). This ratio works well, remains more or less unchanged according to the sample's position within the dyke (Rajhi et al., 2024), and is the most frequently occurring ratio in the SIGEOM (Table 4.8).

The potential map (Figure 4.19) illustrates the spatial distribution of different types of pegmatites within the LMB area. The lowest ratios are shown in red, thus revealing almost all lithium indices. Moreover, it identifies dykes with K/Rb ratios typical of spodumene pegmatites, that are located in the southeastern sector of the LMB. The distribution of these low K/Rb ratios confirms the presence of highly fractionated pegmatites only in the eastern part of the LMB.

When producing the same map for all felsic intrusion analyses compiled from the SIGEOM, no K/Rb ratio value below 20 is present (Figure 4.20). However, it is noted that all values within the LMB are below 240, which is the upper limit for fertile granites (Cerny et al., 1985; Breaks et al., 2003, 2005; Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019; Legault, 2023a). It is also observed that the lowest values are found in the central northern part of the LMB (Lac des Hauteurs showing area) and the northeastern part of the LMB. These observations may indicate that these portions of the LMB are more fractionated. This integrated approach allows for strategic and targeted exploration, based on a robust geochemical vector, which is the K/Rb ratio.

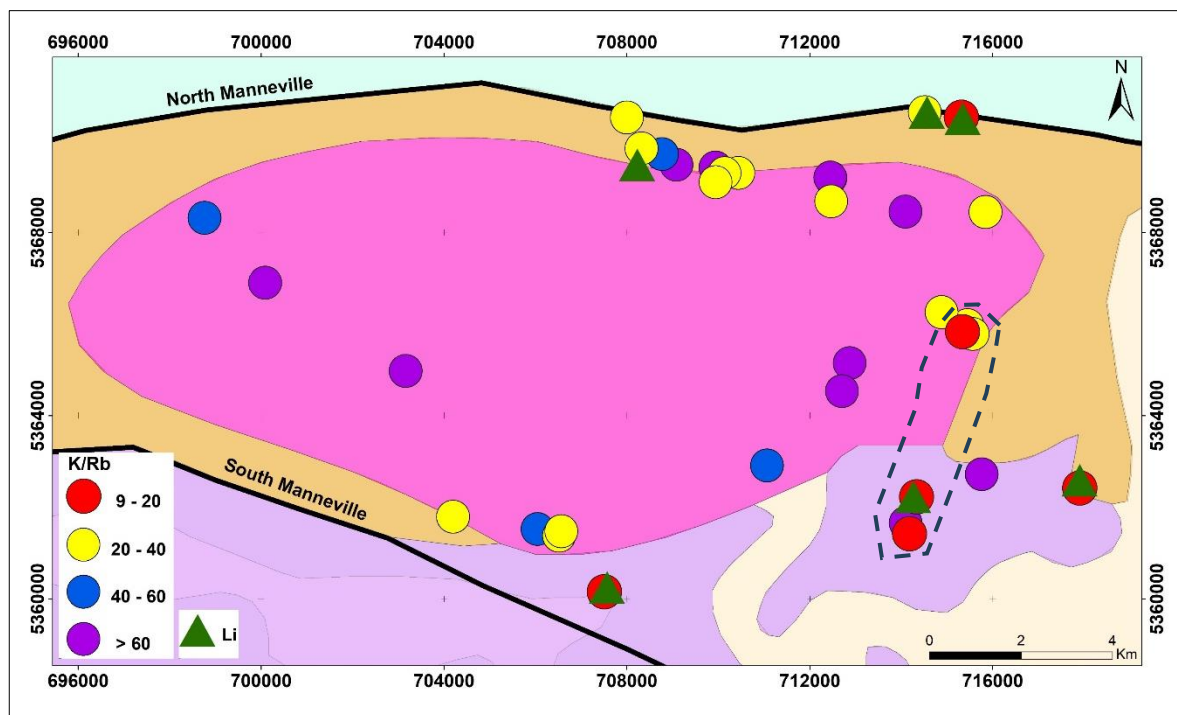


Figure 4.19. Potential map of pegmatites based on the K/Rb ratio using analyses from this study as well as those of Boily et al. (1989). The southeastern sector of the BLM exhibits dykes with low K/Rb ratios where no spodumene mineralization has been identified to date. Geology background from SIGEOM (2022). See figure 4 for geological legend. Green triangles indicate lithium mineralization.

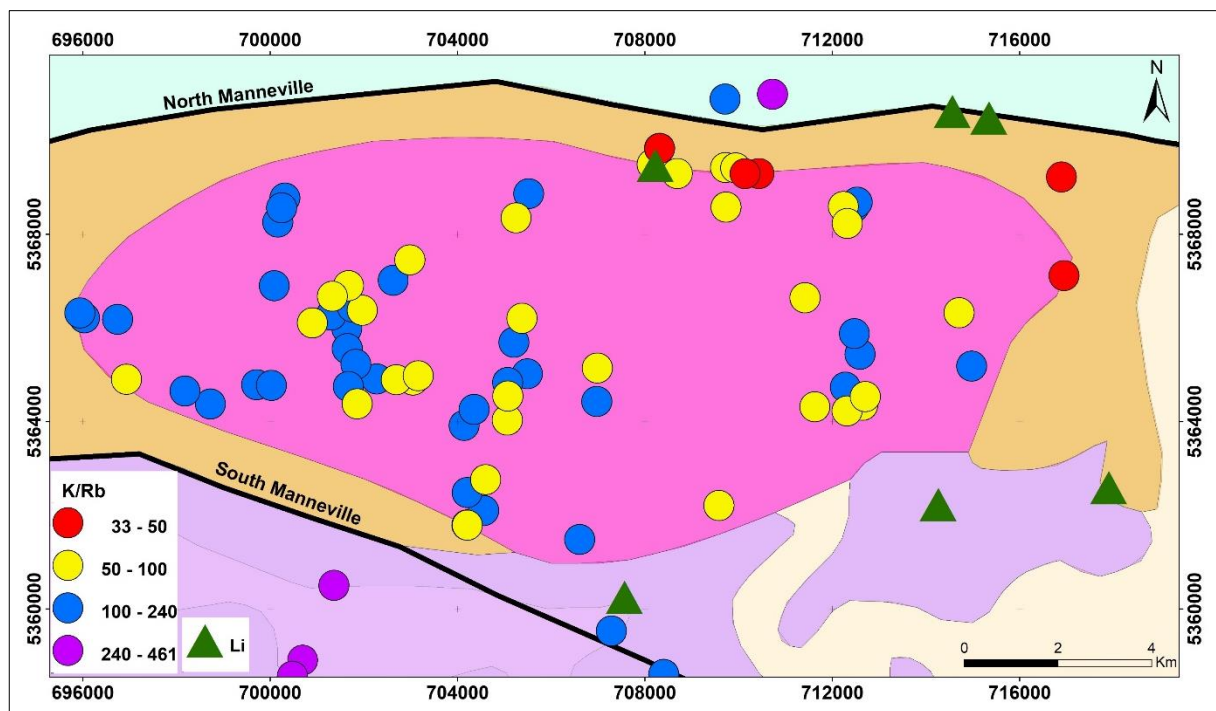


Figure 4.20. Potential map of felsic intrusions based on the K/Rb ratio from the compilation of SIGEOM data in this study. The northern and northeastern sectors of the LMB show the lowest values. Geology background from SIGEOM (2022). See figure 4 for geological legend. Green triangles indicate lithium mineralization.

4.9 Conclusion

The study of the geological, mineralogical, and geochemical characteristics of the La Motte Batholith (LMB) pegmatites has refined information already identified by namely Boily (1992, 1995) and Mulja et al. (1995a, b) of the much larger Preissac – La Corne Plutonic Suite of which the LMB is part of. Our additional data has highlighted the potential in critical and strategic minerals of the area associated with the LMB, particularly for lithium. The mapping and sampling campaign identified a wide diversity of pegmatites, ranging from barren pods to spodumene bearing dykes, and highlighted four pegmatite families, each characterized by a unique degree of magmatic fractionation and distinct geochemical signatures. The geochemical analyses suggest a single magmatic evolution for the late granitic phase of the LMB and the different pegmatite families. The available geochronological analyses would indicate that this evolution took place over several million years, and therefore Cerny's model (1991a, b) may be applicable here. More specifically, the detected variations in the K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li, and Zr/Hf ratios reflect significant variations of the degree of magmatic differentiation of each pegmatite family and its lithium mineralization potential. This study has also identified areas with high lithiniferous potential, even in the absence of visible spodumene. This research underscores the importance of integrating data from the compilation of previous works, mapping, geochemistry, and geochronology in assessing the mining potential of a region.

4.10 Acknowledgements

This project received financial support from the Ministry of Natural Resources and Forests of Quebec (8452 – 2023-2024 – 06) and Elements08. We also wish to extend our heartfelt thanks to the research team (URSTM) at UQAT for their invaluable assistance during the field and ensuing laboratory work.

4.11 References

- Ayres, L.D. and Cerny, P. (1982). Metallogeny of granitoid rocks in the Canadian Shield. *Canadian Mineralogist*, 20: 439-536.
- Ballouard, C., Poujol, M. Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R. & Vigneresse, J.-L. (2016). Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44 (3): 231-234.
- Boily, M. (1992). Exploration des métaux de haute technologie (Li, Be et Ta) dans les systèmes granitiques peralumineux de la région de Preissac-La Corne (Abitibi). MRN, ET 91-09, 32 pages, 1 plan.
- Boily, M. (1995). Pétrogenèse du batholite de Preissac-La Corne : implications pour la métallogénie des gisements de métaux rares. MRNF, ET 93-05, 79 p.
- Boily, M. et Gosselin, C. (2004). Les principaux types de minéralisations en métaux rares (Y-Zr-Nb-Ta-Be-Li-ETR) du Québec. MERN, ET 2004-01, 47 p.
- Boily, M., Pilote, P. & Rallon, H. (1989). La métallogénie des métaux de haute technologie en Abitibi-Témiscamingue. MRN. MB 89-29, 118 pages et 1 plan.
- Bourne, J. & Danis, D. (1987). A proposed model for the formation of reversely zoned plutons based on a study of the La Corne Complex, Superior Province, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(12), 2506-2520.
- Breaks, F. W., Selway, J. B., & Tindle, A. (2003). Fertile peraluminous granites and related rare-element mineralization in pegmatites, Superior Province, northwest and northeast Ontario: Operation Treasure Hunt. Ontario Geological Survey of Canada. OFR 6099.
- Breaks, F. W., Selway, J.B. & 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. (1991a). Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada*, 18(2), 49-67.

- Černý, P. (1991b). Rare-element Granitic Pegmatites. Part II: Regional to Global Environments and Petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18, 68–81.
- Černý, P., Meintzer, R.E. & Anderson, A.J. (1985). Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. *Canadian Mineralogist*, 23, 381-421.
- Daigneault, R., Mueller, W. et Chown, E. (2002). Oblique Archean subduction: accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transgression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Research*, 115(1-4), 261-290.
- Davis, D. W. (2022). Rapport sur les datations U-Pb de roches du Québec 2019-2020. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MB 2021-03.
- Davis, D. W. (2023). Rapport sur les datations U-Pb de roches du Québec 2021-2022. MB 2023-02. Department of Earth Sciences. University of Toronto. MRNF, 202.
- Dawson, R. K. (1966). A comprehensive study of the Preissac-La Corne batholith, Abitibi County, Quebec. *Geological Survey of Canada, Bulletin* 142, 76 pages.
- Ducharme, Y., Stevenson, R. K. & Machado, N. (1997). Sm–Nd geochemistry and U–Pb geochronology of the Preissac and La Motte leucogranites, Abitibi Subprovince. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34(8), 1059-1071.
- Feng, R., 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*; volume 55, pages 3437-3441. doi.org/10.1016/0016-7037(91)90502-V.
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M.-C., Mercier-Langevin, P. & 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.
- Imreh, L. (1984). Sillon de La Motte-Vassan et son avant-pays méridional: synthèse volcanologique, lithostratigraphique et gîtologique. MRN. Québec, ET 87-04.

- Koopmans, L., Martins, T., Linnen, R., Gardiner, N. J., Breasley, C. M., Palin, R. M., Groat, L. A., Silva, D. & Robb, L. J. (2023). The formation of lithium-rich pegmatites through multi-stage melting. *Geology*. <https://doi.org/10.1130/G51633.1>. 52, 5.
- Legault, M. (2023a). Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de Terrain. MRNF. MB 2023-01. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB202301/MB202301RAP001.pdf>.
- Legault, M. (2023b). Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de Terrain. MRNF. MB 2023-17. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB202317/MB202317RAP001.pdf>
- London, D. (2014a). "A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites." *Lithos*, 184–187, 74–104. DOI: 10.1016/j.lithos.2013.10.025.
- London, D. (2018). Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews* 101 (October): 349–83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020>.
- Machado, N., David, J., Carignan, J., Zhang, Q. & Garicpy, C. (1991). Géochronologie U-Pb du territoire québécois: fosses de l'Ungava et du Labrador, Province de Grenville et sous-provinces de Pontiac et de l'Abitibi. Rapport interne soumis au Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Service géologique du Nord-Ouest. GM 59899.
- Ministry of Energy and Resources (1984). Carte de compilation géoscientifique 32D/08. CG032D08PLAN_1-16. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/CG032D08/>.
- Mulja, T., Williams-Jones, A.E., Martin, R.F. & Wood, S.A. (1996). Compositional variation and structural state of columbite-tantalite in rare-element granitic pegmatites of the Preissac-La Corne batholith, Quebec, Canada. *American Mineralogist*, 81, 146-157.
- Mulja, T., Williams-Jones, A. E., Wood, S. A. & Boily, M. (1995b). The rare-element-enriched monzogranite-pegmatite-quartz vein systems in the Preissac-La Corne Batholith, Quebec; II, Geochemistry and petrogenesis. *The Canadian Mineralogist*, 33(4), 817-833.
- Mulja, T., Williams-Jones, A.E., Wood, S.A. & Boily, M. (1995a). The rare element-enriched monzogranite-pegmatite-quartz vein systems in the Preissac-La Corne Batholith, Quebec, I – Geology and mineralogy. *The Canadian Mineralogist*; volume 33, pages 793-815.

- Norman, G. W. H. (1945). Molybdenite deposits and pegmatites in the Preissac-La Corne area, Abitibi County, Quebec. *Economic Geology*, 40(1), 1-17.
- Norman, G.W.H. (1944). La Motte Map-area, Abitibi County, Quebec. Geological Survey of Canada, Paper 44-9, 13 p.
- Pilote, P., Daigneault, R. & Moorhead, J. (2018). Géologie de la région de Barraute Ouest, Sous-province de l'Abitibi, région de l'Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada. MRN, BG 2018-05,2 plans.
- Pilote, P., McNicoll, V., Daigneault, R. & Moorhead, J. (2007). Géologie de la partie ouest du Groupe de Malartic et corrélations à l'échelle de la Ceinture de l'Abitibi (2 de 3). MERN. DV 2007-04, p. 32.
- Pilote, P., McNicoll, V., Daigneault, R. & Moorhead, J. (2009). Projet Malartic Ouest, géologie du secteur du lac Figuery – SNRC 32D08-NE. MERN. DV 2009-05. p. 38.
- Rajhi, S., Legault, M., Mvondo, H., & Potvin, R. (2024). Caractérisation des pegmatites du secteur du Batholite de La Motte, Sous-province de l'Abitibi et son implication pour l'exploration. MB 2024-01. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec. 60 pages.
- Rowe, R. B. (1953). Pegmatitic beryllium and lithium deposits, Preissac-La Corne region, Abitibi county, Quebec. Geological Survey of Canada; Paper 53-3, 40 pages.
- Selway, J. B., Breaks, F. W., & 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 (2022). Carte interactive. Consulté le 28 mars 2022. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr
- Steiner, B. M. (2019). W and Li-Cs-Ta geochemical signatures in I-type granites—A case study from the Vosges Mountains, NE France. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 238-250.
- Stilling, A., Cerny, P., and Vanstone, P.J. (2006). The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba: XVI: Zonal and bulk compositions and their petroge-netic significance: *Canadian Mineralogist*, v. 44, p. 599–623.

- Tremblay, L. P. (1956). Région de Fiedmont, comté d'Abitibi, Québec." Commission Géologique du Canada, Mémoire 253. Ministère des Mines et des Relevés Techniques. Edmond Cloutier, C.M.G., O.A., D.S.P. Imprimeur de la Reine et Contrôleur de la Papeterie, Ottawa, 1956,152 pages.
- Trueman, D. L., & Cerny, P. (1982). Exploration for rare-element granitic pegmatites. In P. Černý (Ed.), *Granitic Pegmatites in Science and Industry*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, 8: 463-493.
- Zeng, Q., Mao, J., Hu, Q., Zhao, X. & Ye, H. (2008). Chronology and cooling history of the Tianmenshan pluton in South Jiangxi Province and their geological significance. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27: 276-284.

Chapitre 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'échantillonnage des roches granitiques et notamment les pegmatites, présente plusieurs défis liés à leur accès, leur diversité minéralogique, leur variabilité granulométrique et à la distribution inégale des minéraux économiques, comme le spodumène. Cette variabilité nécessite des techniques d'échantillonnage adaptées pour assurer la représentativité des échantillons avec une taille d'échantillon gérable. Pour répondre à ces défis, notre compagnie d'échantillonnage a été méticuleusement planifiée.

Le protocole d'échantillonnage a été adapté en fonction de la granulométrie ; dans le cas des granites, dont la granulométrie est relativement fine (< 1 cm), nous avons prélevé entre 1 et 2 kg de matériau, alors que pour les pegmatites, nous avons ciblé les faciès moins grossiers et polyminéraliques de plus de 2 kg. Lorsque les affleurements étaient facilement accessibles (c.-à-d. bordure de route ou par hélicoptère), les échantillons étaient généralement plus gros et pouvaient donc atteindre 5 kg. Bien que cette taille d'échantillon ne puisse pas fournir un échantillon représentatif d'un dyke de pegmatite, elle permet quand même de caractériser la diversité minéralogique de ceux-ci.

La variabilité à l'intérieur d'un même dyke de pegmatite et son impact sur les ratios géochimiques a été testé au gisement d'Authier et sur un dyke à beryl (Rajhi et al., 2024). Les résultats indiquent que malgré la diversité spatiale, texturale et minéralogique, les ratios géochimiques démontrent une grande homogénéité à l'intérieur d'un même dyke. Cette étude démontre que la localisation d'un échantillon à l'intérieur d'un dyke n'a pas d'importance significative sur l'interprétation des résultats régionaux et pour l'exploration des dykes de pegmatite lithinifère.

Néanmoins, au-delà des aspects liés à notre méthode d'échantillonnage, une autre dimension mérite notre attention : la fiabilité des données de localisation provenant des bases de données historiques, voire même de celles issues du SIGEOM. Un exemple fourni par les analyses de Boily et al. (1989), systématiquement décalées d'au moins 200 mètres de leur position réelle, met en évidence les limites des méthodes de localisation pré-GPS. Cette réalité historique appuie la nécessité d'adopter une approche critique dans l'utilisation et l'exploitation des données géologiques et géochimiques datant d'avant l'ère du GPS. L'utilisation des levés LIDAR jumelée à la description textuelle de la localisation des indices permettent une localisation précise des analyses chimiques et des indices historiques.

Après avoir examiné les implications méthodologiques liées à l'échantillonnage et à la précision des données de localisation, il est pertinent aussi de mettre en exergue une technique spécifique qui reflète l'évolution continue des pratiques en géosciences : l'utilisation de la coloration au cobaltinitrite de sodium pour distinguer les feldspaths. Depuis les années 2000, comme rapporté par Goutier et al. (2001), le MRNF a adopté cette technique pour différencier les feldspaths potassiques des plagioclases, améliorant ainsi l'exactitude dans la classification des roches suivant le diagramme de Streckeisen. Dans notre cas d'étude des roches granitiques, la valeur ajoutée de cette technique réside dans sa capacité à affiner l'évaluation des compositions minéralogiques des roches à granulométrie plus fines. Pour les roches plus grossières (pegmatites) cette évaluation des pourcentages est moins critique vu l'hétérogénéité des échantillons mais elle permet d'estimer le ratio feldspath potassique/albite qui demeure assez homogène à l'intérieur d'une même famille et qui permet même de différencier celles-ci. Malgré le fait que l'utilisation de la coloration au cobaltinitrite de sodium est une technique qui date de près de 100 ans (Gabriel et Cox, 1929) elle présente un exemple que les méthodes traditionnelles de caractérisation géologique peuvent toujours contribuer de manière significative à la précision et à la fiabilité de nos études géologiques.

Chapitre 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude visait à caractériser minéralogiquement et géochimiquement les granites et les corps pegmatitiques du secteur du Batholite de La Motte (BLM) dans le but de faire ressortir des zones qui pourraient être prometteuses pour l'exploration du lithium. De ce fait, une variabilité des structures pegmatitiques du BLM a été mise en relief, avec un spectre s'étendant des amas stériles à des dykes enrichis en spodumène. Minéralogiquement ces pegmatites sont classifiées en quatre familles: stérile, à beryl, à colombo-tantalite et à spodumène. Également la relation entre le granite du BLM et les pegmatites stériles à contact graduel et à contact net a été étudiée. Les données géochimiques montrent une relation génétique probable entre les différents faciès pegmatitiques du BLM. Bien que le lien génétique avec les pegmatites à contact graduel avec le granite est évident, celles qui le recoupent montrent un degré de fractionnement plus élevé que ces dernières mais tous dans la même tendance géochimique définie par le granite. Les trois familles de pegmatites minéralisées montrent également un degré de fractionnement plus élevé. Ces observations jumelées aux différents âges d'intrusions granitiques (Machado et al., 1991; Ducharme et al., 1997; Davis, 2023) suggèrent une source magmatique commune qui n'affleure pas (modèle de Koopmans et al (2023)) ou une évolution magmatique du BLM sur plusieurs millions d'années (modèle de Cerny (1991a, b)). Par ailleurs, une conformité des ratios géochimiques (K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf) pour les dykes à spodumène fut démontrée indiquant ainsi une uniformité de ces ratios même à travers un même dyke. Le ratio K/Rb est le plus robuste au sein des dykes à spodumène et est toujours inférieur à 20. Ce ratio pourrait donc servir comme d'outil prédictif efficace pour discriminer les zones à haut potentiel pour les pegmatites à spodumène dont le spodumène n'affleure pas dans leurs segments en surface. En parallèle, l'analyse minérale des feldspaths potassiques et des muscovites réaffirme la fiabilité de ces ratios géochimiques comme indicateurs de potentiel minéral. Ainsi, un secteur potentiel a été mise en exergue dans la région du BLM pour progresser dans l'exploration du lithium. Le ratio K/Rb de la roche totale a été utilisé pour établir une carte de potentiel dont le secteur sud-est du BLM semble contenir des dykes très fractionnés possiblement à spodumène même en absence de celui-ci en affleurement.

Dans une perspective d'amélioration du projet et de clarifier certains points restants ambigus, certaines recommandations et suggestions peuvent être avancées. De prime abord, pour l'échantillonnage, l'utilisation d'une foreuse portative est préférable à celui d'une scie, en raison de sa légèreté et de sa capacité à prélever des carottes de roche sur des surfaces planes, simplifiant la manipulation et la prise d'échantillons sur le terrain. De plus, le recours à un XRF

portable est particulièrement recommandé pour l'analyse des pegmatites, grâce à la taille de leurs cristaux, offrant de ce fait la possibilité d'exécuter des analyses directes sur les minéraux. Cette combinaison d'outils renforce l'efficacité et la précision de l'échantillonnage, optimisant ainsi le temps passé sur le terrain. De surcroît, une étude géochronologique complémentaire devrait être réalisée afin de mieux affiner la compréhension de la séquence de formation des pegmatites et de leur relation avec le granite parent ainsi qu'à expliquer la différence d'âge observée pour mieux déchiffrer la chronologie de l'évolution du batholite et son environnement géologique. Aussi, dans cette visée d'optimisation, il est aussi recommandé de faire une étude approfondie du dyke à spodumène intraplutonique à l'indice du Lac des Hauteurs, qui semble anormale par rapport au modèle classique de Cerny (1991b). Ce dyke semble moins évolué que les autres dykes à spodumène tout en se situant à l'intérieur du pluton. Donc, une étude approfondie s'avère importante pour étudier ses caractéristiques afin de décortiquer le processus pétrogénétique atypique à ce dyke et ses implications pour l'exploration. En fin, il serait également pertinent d'optimiser l'exploration du lithium dans le secteur sud-est du BLM qui semble présenter des dykes très fractionnés.

RÉFÉRENCES

- Aghamirian, M., Saad Ali, S. et McCarley, R. (2018). An investigation into flotation pilot plant testing, Authier lithium project. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 71641, 544 pages.
- 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.
- Barros, R., Kaeter, D., Menuge, J. F., Fegan, T., & Harrop, J. (2022). Rare Element Enrichment in Lithium Pegmatite Exomorphic Halos and Implications for Exploration: Evidence from the Leinster Albite-Spodumene Pegmatite Belt, Southeast Ireland. *Minerals*, 12(8), 981.
- Beus, A., Berengilova, V., & Grabovskaya, L. (1968). Geochemical exploration for endogenic deposits of rare elements on the example of tantalum. Nedra, Moscow, Engl. Transl. GSE Libr, Ottawa.
- Boily, M. (1992). Exploration des métaux de haute technologie (Li, Be et Ta) dans les systèmes granitiques peralumineux de la région de Preissac-La Corne (Abitibi). MRN, ET 91-09, 32 pages, 1 plan.
- Boily, M. (1995). Pétrogenèse du Batholite de Preissac-La Corne : implications pour la métallogénie des gisements de métaux rares. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. ET 93-05, 79 pages.
- Boily, M. (2010). Technical report and recommendations for the Li-Mo properties associated with the Preissac-Lacorne Batholith, The Chubb, International and Athona properties, Mineral Hills Industries Ltd. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 64977, 135 pages.
- Boily, M., & Gosselin, C. (2004). Les principaux types de minéralisations en métaux rares (Y-Zr-Nb-Ta-Be-Li-ETR) du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. ET 2004-01, 47 pages.
- Boily, M., Pilote, P., & Rallon, H. (1989). La métallogénie des métaux de haute technologie en Abitibi-Témiscamingue. MRN. MB 89-29, 118 pages et 1 plan.

- Boily, M., Williams-Jones, A., Mulja, T., & Pilote, P. (1990). Rare element granitic pegmatites in the Abitibi greenstone belt: a case study of the Preissac-La Corne batholith. Institut canadien des Mines et de la Métallurgie. Volume Spécial 43, 299-312.
- Bonzi, W. M.-E. (2021). Origine, évolution et minéralisation en métaux rares des pegmatites de l'Afrique de l'Ouest, Université Paul Sabatier-Toulouse III; Université Joseph Ki-Zerbo.
- Breaks, F. W., & Moore, J. M., Jr. (1992). The Ghost Lake batholith, Superior Province of northwestern Ontario: a fertile, S-type, peraluminous granite-rare-element pegmatite system. *The Canadian Mineralogist*, v.30, 835-875.
- Breaks, F. W., & Tindle, A. (1997). Rare-metal exploration potential of the Separation Lake area: an emerging target for Bikita-type mineralization in the Superior Province of Ontario.
- Breaks, F. W., Selway, J. B., & Tindle, A. (2003). Fertile peraluminous granites and related rare-element mineralization in pegmatites, Superior Province, northwest and northeast Ontario: Operation Treasure Hunt.
- 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.
- Brett, P. R., Jones, R E., Latulippe, M., Leuner, W R. (1976). Canton de La Motte. MRN. RG 160. 164 pages et 161 plans.
- Brogniart, A. (1813). *Essai d'une classification minéralogique des roches mélangées*. Bossange.
- Cameron, E. N., Jahns, R. H., McNair, A. H., & Page, L. R. (1949). Internal structure of granitic pegmatites. *Economic Geology Monograph* 2, 115 pages.
- Černý, P. (1989). Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum. Dans: *Lanthanides, tantalum, and niobium*. Springer, 274-302.
- Černý, P. (1991a). Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada*, 18(2), 49-67.
- Černý, P. (1991b). Rare-element Granitic Pegmatites. Part II: Regional to Global Environments and Petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18, 68–81.

- Černý, P. (1992). Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research. *Appl. Geochem., Minerals for Future Materials Selected Papers from the Symposium Sponsored by the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry, held during the 15th General Meeting of the International Mineralogical Association 7*, 393-416.
- Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), 2005-2026.
- Černý, P., Blevin, P.L., Cuney, M., & London, D. (2005). Granite-related ore deposits. *Econ. Geol. 100th Anniversary*, 337–370.
- Černý, P., Chapman, R., Stanè, J., Novà, M., Baadsgaard, H., Rieder, M., Kavalová, M., Ottolini, L. (1995). Geochemical and structural evolution of micas in the Rožná and Dobrá Voda pegmatites, Czech Republic. *Mineral. Petrol.* 55, 177–201. doi:10.1007/BF01162587.
- Cerny, P., Meintzer, R. E., & Anderson, A. J. (1985). Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected examples of data and mechanisms. *The Canadian Mineralogist*, 23(3), 381-421 pages.
- Černý, P., Thomas, D.L., Zurevinski, D.V., & Poulsen, B.J. (1981). The Cat Lake Winnipeg River and the Weskusko Lake pegmatite fields, Manitoba; Manitoba Department of Energy and Mines, Mineral Resources Division, Economic Geology Report ER80-1, 216 pages.
- Ciesielski, A. (1978). Géologie du canton de Villemontel. Ministère des Richesses naturelles. DP-615, 11 pages et 1 plan.
- Cooke, H. C., James, W. F., and Mawdsley, J. B. (1931). Geology and ore deposits of the Rouyn- Harricanaw region, Quebec; Geological Survey of Canada, Memoir. 166.
- Cunningham, R. C. (1956). Report on geology and DDH. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec; GM 03959-A, 33 pages et 1 plan.
- Davis, D. W. (2022). Rapport sur les datations U-Pb de roches du Québec 2019-2020. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MB 2021-03.
- Davis, D. W. (2023). Rapport sur les datations U-Pb de roches du Québec 2021-2022. MB 2023-02. Department of Earth Sciences. University of Toronto. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 202 pages.

- Dawson, R. K. (1954). Structural Features of the Preissac-La Corne batholith, Abitibi County, Québec. Geological Survey of Canada, Paper 53-4, 27 pages.
- Dawson, R. K. (1966). A comprehensive study of the Preissac-La Corne batholith, Abitibi County, Quebec. Geological Survey of Canada, Bulletin 142, 82 pages.
- Delesse, A. (1849). Mémoire sur la constitution minéralogique et chimique des roches des Vosges : Serpentine des Vosges. Éditeur inconnu.
- Derry, D. R. (1950). Lithium-bearing pegmatites in northern Quebec. *Economic Geology*, 45(2), 95-104.
- Deveaud, S. (2015). Caractérisation de la mise en place des champs de pegmatites à éléments rares de type LCT: exemples représentatifs de la chaîne Varisque, Université d'Orléans].
- Dill, H. G. (2015). Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, 69, 417-561.
- Ducharme, Y., Stevenson, R. K., & Machado, N. (1997). Sm–Nd geochemistry and U–Pb geochronology of the Preissac and La Motte leucogranites, Abitibi Subprovince. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34(8), 1059-1071.
- Duchesne, J.-C. (2014). Introduction à la Géochimie (pour mieux comprendre comment fonctionne notre Terre). Université de Liège. Available at: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/171037/1/Intro%20Ge%CC%81ochimie.pdf>. 67pages.
- Dugas, J., & Hogg, W.A. (1960). Quart nord-est du canton de Preissac, comté d'Abitibi-Est. Ministère des Mines. 1 plan.
- Dumont, G. H. (1960). Diamond Drill Holes. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 09465-B, 55 pages et 1 plan.
- Dunn, F. S. (1954). Rapport géologique. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 03741, 11 pages et 5 plans.
- Ercit, T. S., Linnen, R., & Samson, I. (2005). REE-enriched granitic pegmatites. Rare-element geochemistry and mineral deposits: Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes, 17, 175-199.
- Errandonea-Martin, J., Garate-Olave, I., Roda-Robles, E., Cardoso-Fernandes, J., Lima, A., dos Anjos Ribeiro, M. et Cláudia Teodoro, A. (2022). Metasomatic effect of Li-bearing

- aplite-pegmatites on psammitic and pelitic metasediments: Geochemical constraints on critical raw material exploration at the Fregeneda–Almendra Pegmatite Field (Spain and Portugal). *Ore Geology Reviews*, 150.
- Feng, R., Kerrich, R., McBride, S., Farrar, E. (1992). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the thermal history of the Archean Abitibi greenstone belt and the Pontiac Subprovince: implications for terrane collision, differential uplift, and overprinting of gold deposits. *Revue canadienne des sciences de la Terre*; volume 29(7), pages 1389-1411.
- Fox, C. (1955). Diamond drill record. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 03741, 33 pages et 3 plans.
- Frost, B. R., Chamberlain, K. R., & Schumacher, J. C. (2001). Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chemical geology*, 172(1-2), 131-148.
- Gabriel, A., & Cox, E. P. (1929). A staining method for the quantitative determination of certain rock minerals. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 14(8), 290-292.
- Galeschuk, C., & Vanstone, P. (2005). Exploration for buried rare-element pegmatites in the Bernic Lake area of southeastern Manitoba. *GAC Short Course Notes*, 17, 159-173.
- Galeschuk, C., & Vanstone, P. (2007). Exploration techniques for rare-element pegmatite in the Bird River greenstone belt, southeastern Manitoba. *Proceedings of exploration*. Vol. 7, 823-839.
- Gerrie, W. (1927). Molybdenite in La Corne and Malartic townships, Quebec. Univ. Toronto Studies. Geolical Series. No. 24.
- Gilmour, W. (2010). Assessment Report on Prospecting and Geochemical Survey, Lac La Motte South and East Properties. Mining Exploration file. GM, 65110, 50 pages.
- Gordiyenko, V. (1971). Concentrations of Li, Rb, and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare-metal mineralization in granite pegmatites. *International Geology Review*, 13(2), 134-142.
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J., & Galiege, X. (2019). Re-assessing the European lithium resource potential—A review of hard-rock resources and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 109, 494-519.

- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M.-C., Mercier-Langevin, P., & Davis, D. W. (2001). Géologie de la colline Masson (33F/09), de la passe Awapakamich (33F/10), de la baie Caillet (33F/15) et de la passe Pikwahipanan (33F/16). Ministère des Ressources naturelles du Québec. RG 2000-10, 70 pages.
- Gouze, A. (2010). Le lithium : un métal stratégique. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 58(2), 84-91. <https://doi.org/10.3917/re.058.0084>.
- Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Kesler, S. E., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2011). Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 760-775.
- Güssow, W. C. (1937). Petrogeny of the major acid intrusives of the Rouyn-Bell River area, Northwestern Quebec, Massachusetts Institute of Technology. Thèse de doctorat.
- Haidinger, W. (1845). *Handbuch der bestimmenden Mineralogie: enthaltend die Terminologie, Systematik, Nomenklatur und Charakteristik der Naturgeschichte des Mineralreiches*. Braumüller & Seidel.
- Harker, A. (1909). *The Natural History of Igneous Rocks*. Methuen and Co.
- Hawley, J. E. (1931). Gisements de molybdénite, canton de La Corne, Abitibi, partie C. RASM 1930-C2(Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles), 37pages ,3plans.
- Imreh, L. (1984). Sillon de La Motte-Vassan et son avant-pays méridional: synthèse volcanologique, lithostratigraphique et gîtologique. Ministère des Ressources Naturelles. Québec, ET, 87-04.
- Imreh, L. (1991). Notes accompagnant les cartes préliminaires au 1/15 840 de l'Abitibi-est méridional, projet de gîtologie prévisionnelle, coupure 32C/05 W. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, MB 90-39, 18 pages, 2 plans.
- Ingham, W.N. (1958). Journal des sondages au diamant. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 06589-B, 26 pages et 1 plan.
- Jahns, R. H., & Burnham, C. W. (1969). Experimental studies of pegmatite genesis; I, A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Economic Geology*, 64(8), 843-864.
- Jébrak, M. et Marcoux, É. (2008). *Géologie des ressources minérales*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. MM 2008-01, 667 pages.

- Johnston, J. F. E. (1902). Eastern part of the Abitibi region, Nipissing District, Ontario; Geological Survey of Canada, Summary Report 1901, pp. 128-141.
- Johnston, J. F. E. (1902). Eastern part of the Abitibi regions, Quebec. Geological Survey of Canada; Summary Report 1901, part A, pages 130-143.
- Koopmans, L., Martins, T., Linnen, R., Gardiner, N. J., Breasley, C. M., Palin, R. M., Groat, L. A., Silva, D., & Robb, L. J. (2023). The formation of lithium-rich pegmatites through multi-stage melting. *Geology*. <https://doi.org/10.1130/G51633.1>. 52, 5.
- Leduc, M. (1980). Géologie et lithogéochimie des masses batholitiques de la région de de Preissac Ministère des Ressources Naturelles, Québec. DPV 779, 160 pages et 2 plans.
- Legault, M. (2023a). Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de Terrain. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. MB 2023-01. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB202301/MB202301RAP001.pdf>.
- Legault, M. (2023b). Travaux de recherche sur les minéraux critiques et stratégiques réalisés par les stagiaires de l'École de Terrain. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. MB 2023-17. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB202317/MB202317RAP001.pdf>.
- Leuner, W. R. (1959). Rapport préliminaire sur la moitié ouest du canton de La Motte, district électoral d'Abitibi-est. Ministère des Ressources Naturelles, Québec. RP 405, 14 pages et 2 plans.
- Linnen, R. L., Van Lichtenvelde, M. et Černý, P. (2012). Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8: 275-280.
- London, D. (1990). Internal differentiation of rare-element pegmatites: a synthesis of recent research. *Geological Society of America Special Paper*, 246, 35-50.
- London, D. (2008). Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, Special Publication No. 10, Mineralogical Association of Canada, 368 pages.
- London, D. (2014a). "A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites." *Lithos*, 184–187, 74–104. DOI: 10.1016/j.lithos.2013.10.025.

- London, D. (2015). Reply to Thomas and Davidson on "A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites"(London, 2014a). *Lithos*, 212, 469-484.
- London, D. (2018). Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101, 349-383.
- London, D., Hervig, R.L. et Morgan, G.B. (1988). Melt-vapor solubilities and elemental partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems: experimental results with Macusani glass at 200 MPa. *Mineralogy and Petrology*, 99(3), 360-373.
- London, D., Morgan, G. B., & Icenhower, J. (1998). Stability and solubility of pollucite in the granite system at 200 MPa H₂O. *The Canadian Mineralogist*, 36(2), 497-510.
- Machado, N., David, J., Carignan, J., Zhang, Q., Garicpy, C. (1991). Géochronologie U-Pb du territoire québécois: fosses de l'Ungava et du Labrador, Province de Grenville et sous-provinces de Pontiac et de l'Abitibi. Rapport interne soumis au Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Service géologique du Nord-Ouest, vol. 2, rapport intérimaire.
- Maneta, V., & Baker, D. R. (2019). Les pegmatites d'éléments rares du sous-type spodumène : Partie I. Cadre géologique, minéralogie du lithium et géochimie des isotopes stables. *Ore Geology Reviews*, 107, 29-56.
- Marchal, K. L., Simmons, W. B., Falster, A. U., Webber, K. L., & Roda-Robles, E. (2014). Geochemistry, mineralogy, and evolution of Li-Al micas and feldspars from the Mount Mica pegmatite, Maine, USA. *The Canadian Mineralogist*, 52(2), 221-233.
- Martin, R. F., & Vito, C. D. (2005). The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *Canadian Mineralogist*, 43, 2027-2048.
- Martins, T., Encarnación, R.-R., Alexandre, L., & de Parseval, P. (2012). Geochemistry and evolution of micas in the Barroso–Alvão pegmatite field, Northern Portugal. *The Canadian Mineralogist*, 50(4), 1117-1129.
- McCarthy, T., & Hasty, R. (1976). Trace element distribution patterns and their relationship to the crystallization of granitic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(11), 1351-1358.
- McOuat, W. (1873). Report on an examination of the country between Lake Timiskaming and Abitibi. Report of Progress, Geological Survey of Canada, 112-135.

- Meintzer, R. E. (1988). The mineralogy and geochemistry of the granitoid rocks and related pegmatites of the Yellowknife pegmatite field, Northwest Territories. Thèse de doctorat, University of Manitoba. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/1993/28677>.
- Melleton, J., Gloaguen, E., Frei, D., Novák, M., & Breiter, K. (2012). How are the emplacement of rare-element pegmatites, regional metamorphism and magmatism interrelated in the Moldanubian domain of the Variscan Bohemian Massif, Czech Republic? *The Canadian Mineralogist*, 50(6), 1751-1773.
- Möller, P., & Morteani, G. (1987). Geochemical exploration guide for tantalum pegmatites. *Economic Geology*, 82(7), 1888-1897.
- Morgan, G. B., & London, D. (1987). Alteration of amphibolitic wallrocks around the Tanco rare-element pegmatite, Bernic Lake, Manitoba. *American Mineralogist*, 72(11-12), 1097-1121.
- Morteani, G., & Gaupp, R. (1989). Geochemical evaluation of the tantalum potential of pegmatites. Dans : *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Springer. pp. 303-310.
- MRNF. (2022). Lexique stratigraphique. Consulté le 4 avril 2022. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-du-superieur/suite-plutonique-de-preissac-la-corne/>.
- Mulja, T., Williams-Jones, A. E., & Martin, R. F., & Wood, S. A. (1996). Compositional variation and structural state of columbite-tantalite in rare-element granitic pegmatites of the Preissac-La Corne batholith, Quebec, Canada. *American Mineralogist*, 81, 146-157.
- Mulja, T., Williams-Jones, A. E., Wood, S. A., & Boily, M. (1995b). The rare-element-enriched monzogranite-pegmatite-quartz vein systems in the Preissac-La Corne Batholith, Quebec; II, Geochemistry and petrogenesis. *The Canadian Mineralogist*, 33(4), 817-833.
- Mulja, T., Williams-Jones, A.E., Wood, S. A et, Boily, M.(1995a). The rare element-enriched monzogranite-pegmatite-quartz vein systems in the Preissac-La Corne Batholith, Quebec.I. Geology and mineralogy. *The Canadian Mineralogist*, 33. 793-815.
- Müller, A., Reimer, W., Wall, F., Williamson, B., Menuge, J., Brönnner, M., . . . Lima, A. (2023). GREENPEG—exploration for pegmatite minerals to feed the energy transition: First

- steps towards the Green Stone Age. Geological Society, London, Special Publications, 526(1), SP526-2021-2189.
- Müller, A., Romer, R. L., & Pedersen, R.-B. (2017). The Sveconorwegian Pegmatite Province—Thousands of pegmatites without parental granites. *The Canadian Mineralogist*, 55(2), 283-315.
- Mulligan, R., 1968, *Geology of Canadian Beryllium Deposits*, Commission Géologique du Canada, Economic Geology Report no. 23, 109 pages.
- Norman, G. W. H. (1944). Geological report of the property. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 10338, 15 pages et 2 plans.
- Norman, G. W. H. (1944). La Motte map area, Abitibi County, Quebec. Geological Survey of Canada. Paper 44-9, 13 pages, 12 maps.
- Norman, G. W. H. (1945). Molybdenite deposits and pegmatites in the Preissac-La Corne area, Abitibi County, Quebec. *Economic Geology*, 40(1), 1-17.
- Norton, J. J. (1973). Lithium, cesium, and rubidium. Geological Survey Professional Paper (820), 365 pages.
- O'Neil, V.B. (1957). 2 DDH logs. Rapport statutaire déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. GM 06434-A, 5 pages et 2 plans.
- Pilote, P. (2016). Compilation géologique – Lac de Montigny. Ministère des Ressources Naturelles, Québec. CG-2016-2013, 2012 plans.
- Pilote, P., Daigneault, R., Moorhead, J. (2018). Géologie de la région de Barraute Ouest, Sous-province de l'Abitibi, région de l'Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada. Ministère des Ressources naturelles. BG 2018-05, <https://gq.mines.gouv.qc.ca/bulletins-geologiques/barraute-ouest/>
- Rive, M., Pintson, H., Ludden, J., Verpaerst, P., Gagnon, Y., Lulin, J., & Riverin, G. (1990). Characteristics of late Archean plutonic rocks from the Abitibi and Pontiac subprovinces, Superior Province, Canada. Superior Province, Canada. In the Northwestern Quebec Polymetallic Belt. (Éditeurs: M. Rive, P. Verpaerst, J. Gagnon, J.-M. Lulin, G. Riverin et A. Simard). Canadian Institute of Mining and metallurgy; Special Volume 43, 65-76 pages.

- Rowe, R. B. (1953). Pegmatitic beryllium and lithium deposits, Preissac-La Corne region, Abitibi county, Quebec. Geological Survey of Canada; Paper 53-3, 40 pages et 5 plans.
- Selway, J. B., Breaks, F. W., & 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.
- Seydoux, J.-M. et Fontan, F. (1983). Les pegmatites, géologie et genèse. *Géochronique*.
- Sharpe, J. I. (1961). Rapport préliminaire sur la demie sud du canton de Figury et le quart sud-ouest du canton de Landrienne, comté d'Abitibi-est. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, RP 446. 18 pages et 1 plan.
- SIGÉOM (2022). Carte interactive. Consulté le 28 mars 2022. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr
- Simmons, W. B. S., & Webber, K. L. (2008). Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*, 20(4), 421-438.
- Siroonian, H., Shaw, D. M., & Jones, R. E. (1959). Lithium geochemistry and the source of the spodumene pegmatites of the Preissac-La Motte-La Corne region of western Quebec. *The Canadian Mineralogist*, 6(3), 320-338.
- Steiner, B. (2018). Rwanda Pegmatites and Exploration Strategy. Unpublished Report Mila Resources.
- Steiner, B. M. (2019a). W and Li-Cs-Ta geochemical signatures in I-type granites—A case study from the Vosges Mountains, NE France. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 238-250.
- Steiner, B. M. (2019b). Tools and workflows for grassroots Li–Cs–Ta (LCT) pegmatite exploration. *Minerals*, 9(8), 499.
- Stewart, D. B. (1978). Petrogenesis of lithium-rich pegmatites. *American Mineralogist*, 63(9-10), 970-980.
- Stilling, A., Cerny, P., and Vanstone, P.J. (2006). The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba: XVI: Zonal and bulk compositions and their petroge-netic significance: *Canadian Mineralogist*, v. 44, p. 599–623.
- Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution. United States, 312 pages.

- Tindle, A. G., & Pearce, J. A. (1981). Petrogenetic modelling of in situ fractional crystallization in the zoned Loch Doon Pluton, Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(2), 196-207.
- Tindle, A., Breaks, F., & Selway, J. (2001). Electron microprobe compositions of tantalum-bearing oxides and potassium feldspar from rare-element granitic pegmatites, Superior Province, northwestern Ontario; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release-Data 90.
- Tremblay, L.-P. (1950). Fiedmont map-area, Abitibi county, Québec. Commission Géologique du Canada. Mémoire 253, 152 pages.
- Trueman, D. (1982). Exploration for rare-element granitic pegmatites. In P. Černý (Ed.), *Short course in granitic pegmatites in science and industry*, 463-493.
- Van Lichtenvelde, M. (2006). Métallogénie du tantale: application aux différents styles de minéralisations en tantale dans la pegmatite de Tanco, Manitoba, Canada, Université de Toulouse 3. Thèse de doctorat.
- Wilson, M. (1913). Kewagama Lake map-area, Quebec: Geol. Survey of Canada, Memoir 39, 134 pages.
- Wise, M. A., Müller, A., & Simmons, W. B. (2022). A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 60(2), 229-248.
- Zasedatelev, A. (1974). Possible accumulation of lithium in host rocks of lithium pegmatite veins during old sedimentation processes. *Doklady. Acad. Sci. USSR, Earth Sci. Ser.*, 218, 196-198.

ANNEXES

ANNEXE1. Tableau récapitulatif présentant les indices existants autour et dans le Batholite de la Motte avec leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques. (-) = absence d’informations; colonne affleurement = présence ou non d’affleurement. Indices en gris sont des indices non-métalliques dans le SIGEOM et donc ne contiennent pas de teneurs chimiques.

Nom de la zone minéralisée	Estant(m)	Nordant(m)	Forme	Affleurement	Direction	Pendage	Minéralogie	Éléments chimiques		Référence
								Élément principal	Élément secondaire	
Lavandin	698004	5368796	Des dykes de pegmatite; reconnues sur 90 à 120 mètres de largeur	Non	E-NE	Pendage variable	Molybdénite, quartz,	Mo	Bi	Ingham (1958)
Lavandin-2	698752	5368240	Deux dykes de 30 m de longueur par 3 m de largeur maximum	Oui	E-O	-	Béryl	Be		Ingham (1958)
Ranger	696993	5367902	Dykes de pegmatite et de veines de quartz pegmatitique; dimensions inconnus	Oui	-	-	Molybdénite, quartz, bismuthinite	Mo	Bi	O'Neil (1957)
Height of Land	695804	5366592	Des dykes très irréguliers; 460 m de longueur sur une largeur de 75 m	Oui	N-NE	60° NO	Molybdénite, bismuthinite, béryl, chalcopyrite, pyrite-pyrrhotite, phénacite (un silicate de béryllium), feldspath, muscovite	Mo Bi	Cu Be	Mulligan (1968)
Dénommé	696197	5365451	Quelques dykes de pegmatite et de veines de quartz pegmatitiques; dimensions inconnues	Oui	N-O	-	Molybdénite, quartz, grenat, chlorite	Mo	Bi	Dumont (1960)
Aldous	704205	5361800	Dyke d’environ 180 m de long; à son extrémité E, le dyke a environ 7 m de largeur	Oui	E-O	15-30° vers N	Tantalite, béryl, quartz, muscovite, albite, grenat, spodumène,	Ta Nb	Be	Norman (1944)
Authier	707562	5360250	Dyke de pegmatite 1100 m de longueur et 25m épaisseur moyenne	Oui	E-O	40°vers le N	Spodumène, molybdénite, lithiophilite (phosphate de lithium et manganèse), béryl, quartz	Li	Be Me	Aghamirian et al. (2018)
Duval-Lithium	714262	5362230	Deux dykes de pegmatite : 1) 182 m de longueur et 1,83 m de largeur 2) 259 m de longueur et < 6,1 m de largeur	Oui	N290-300 N290-300	35-55° vers N 45-85° vers N	Spodumène, feldspath, plagioclase, quartz, muscovite, grenat, tantalite, molybdénite	Li Mo	Cu Ta	Cunningham (1956)
La Motte	717900	5362591	Dyke < 1m mètre de largeur	Oui	N250	47° vers N	Spodumène, muscovite, biotite	Li	-	Gilmour (2010)
International Lithium	715341	5370490	Quelques dykes de pegmatite irréguliers; 100 m de longueur sur 10 m d'épaisseur apparente	Oui	N280	0-30° vers N	Spodumène, quartz, béryl, columbite, tantalite, fluorite, feldspath, muscovite	Li	Mo Ta Be	Boily (2010)
Bouvier	714559	5370630	Dyke minéralisé exposé de façon intermittente; 180 m de longueur et 5-14 m de large	Oui	ONO-ESE	45° vers le S	Quartz, spodumene, cleavelandite, feldspath, muscovite	Li	-	Boily (2010)
Northern Québec	710969	5369537	Des dykes dont l'orientation et les dimensions ne sont pas identifiées	Non	-	-	Molybdénite, muscovite	Mo	-	Fox (1956)
Lac des Hauteurs	708211	5369690	Deux dykes de pegmatite, 0,9 mètre de largeur	Oui	N110 à N125	Vertical	Spodumène, feldspath, quartz, muscovite, colombo-tantalite	Ta	Nb Li	Dunn (1954) Boily et al. (1989)
Dumulon	715492	5365730	Dykes de pegmatite; < 5m d'épaisseur et jusqu'à 165 m de longueur	Oui	N275 à N290	Abrupt vers N	Quartz, albite, microcline, cleavelandite, muscovite, béryl			Cunningham (1956)
La Motte VII-47	717772	5362380	Même chose que l’indice La Motte							
La Motte VI-2	706052	5360705	Probablement l’extension ouest du gisement Authier							
Boily-1	712562	5369130	Deux dykes de 2-3 m d’épaisseur suivi sur 150 m	Oui	N075-080	Vertical	Béryl, apatite, muscovite, feldspath, quartz, grenat			Norman (1944) Boily et al. (1989)
Tantalum*	708005	5370522	Dyke de 1,5 m d’épaisseur suivi sur plus de 300 m	Oui	NO-SE	Vertical	Colombo-tantalite, spodumène, albite, quartz, muscovite, grenat			Norman (1944)
Quebec Beryllium	710422	5369255	Nombreux dykes jusqu’à 6 m d’épaisseur	Oui	E-O à NO-SE	-	Béryl, colombo-tantalite, quartz, feldspath, muscovite, grenat, apatite			Norman (1944) Boily et al. (1989)

* - Les coordonnées dans la base de données SIGEOM sont erronées. Les coordonnées ci-contre sont celles de l’indice original de Norman (1944).

*Nb : Il y a des indices qui se sont ajoutés lors de la compilation, qui ne sont pas dans le répertoire du SIGEOM et qui ne sont pas présentés ici.

ANNEXE2. Tableau descriptif de la composition minéralogique et le pourcentage modale des lames minces observées. Abréviations : Ms = muscovite, Ms (I et II) = muscovite primaire et secondaire.

No. de l'échantillon 22-SR-XXXX	Quartz (%)	Feldspaths	Ms (I et II) (%)	Ms recristallisée (%)	Biotite (%)	Grenat (%)	Titane (%)	Séricite (%)	Tourmaline (%)	Magnétite (%)	Apatite (%)	Béryl (%)	Colombo-tantalite (%)	Spodumène (%)
1001/1	40	25% (très altérés difficiles à distinguer)			15	2	10	1	2					
1004A	40	30 % anorthoclase et 1 % orthose	27	2										
1007A	45	15% oligoclase	1		10	1	15	8	2	3				
1009A	40	20 % anorthoclase et 2 % albite	36			2								
1012A	40	30 % orthose	1		8	1	15	1	1	3				
1013A	45	1% orthose perthitique et 22% albite	20			1					10	1		
1017A	45	28% microcline et 8% albite	15	1		1				2				
1019A	35	10% albite et 35% microcline	15			4				1				
1021A	45	35% orthose	1		8	2	4	2	1	2				
1022A	35	10% albite, 35% microcline et 5% orthose	2		12					1				
1023A	40	10% albite et 6% microcline	4	4									1	35
1024A	45	30% microcline et 15% albite	2		8									
1026A	48	45% anorthoclase	6			1								
1028B	45	30% orthose perthitique et 20% albite	3							2				
1030A	30	15% albite	6	3		3		3						40
1031A	45	25% albite et 20% microcline	2		8									
1032A	55	20% albite et 14% orthose	10										1	
1035A	40	30% microcline et 10% albite	2		10					8				
1037A	30	35% microcline et 15% albite	10		8	2								
1038A	45	30% microcline et 10% albite	15											
1038B	50	30% albite et 18% orthose	1			1								
1040A	44	25% microcline et 10% albite	10		10	1								
1040B	50	30% albite et 15% microcline	4			1								
1041A	40	15% orthose perthitique et 15% albite	25	5										
1041B	45	35% albite et 10% microcline	10											
1042A	45	25% d'anorthoclase et 15% albite	4			5							6	
1043A	25	8% orthose et 3% albite	5	4		5				5	5			40
1043B	45	20% microcline et 20% albite	10		2	3								
1044A	50	14% orthose et 30% albite	4	1		1								
1045A	45	50% albite et 1% microcline	1								3			
1046D	45	40% albite et 10% microcline	4			1								
1047A	40	30% albite et 15% microcline	5			5							5	
1047B	30	30% microcline et 25% albite	1		8		2			4				
1047C	30	40% albite et 15% anorthoclase	10			2							3	

ANNEXE3. Analyses de la microsonde montrant les analyses chimiques des minéraux. Échantillon : Affleurement 2022-SR-XXXX. Abréviation : Brl = Béryl, bord = bordure, rim = bordure ou marge, CoTa = colombo-tantalite, Grt = grenat; Kfs = feldspath potassique, Line = ligne, Ms = muscovite, na = non analysé, core = noyau, Spd = spodumène.

Échantillon 22-SR-XXXX	Pegmatite à	P2O5	SiO2	TiO2	Al2O3	MgO	CaO	MnO	FeO	SrO	BaO	Na2O	K2O	Rb2O	Cs2O	Total
1004A Kfs 1	Brl	0,123	63,691	0,038	18,525	0,000	0,001	0,000	0,012	0,000	0,046	0,337	15,862	0,435	0,007	99,077
1004A Kfs 2	Brl	0,104	64,004	0,016	18,754	0,000	0,004	0,000	0,013	0,000	0,000	0,336	15,906	0,397	0,011	99,546
1004A Kfs 3	Brl	0,100	63,854	0,022	18,655	0,000	0,012	0,000	0,025	0,000	0,000	0,405	15,830	0,429	0,013	99,346
1004A Kfs 4	Brl	0,060	63,853	0,000	18,672	0,003	0,019	0,016	0,018	0,000	0,000	0,416	15,892	0,402	0,002	99,350
1004A Kfs 5	Brl	0,087	63,616	0,000	18,743	0,002	0,003	0,000	0,008	0,000	0,000	0,348	16,050	0,411	0,000	99,265
1019A Kfs 1	stérile	0,000	64,270	0,070	18,784		0,012	0,051	0,005	0,000	0,000	0,412	16,071	0,014	0,012	99,702
1019A Kfs 2	stérile	0,041	64,733	0,038	18,911		0,035	0,000	0,006	0,000	0,011	1,565	14,890	0,043	0,000	100,272
1019A Kfs 3	stérile	0,026	64,347	0,000	18,651		0,007	0,000	0,003	0,000	0,000	0,438	16,035	0,089	0,013	99,609
1019A Kfs 4	stérile	0,098	64,456	0,065	18,850		0,031	0,025	0,000	0,000	0,084	0,522	15,799	0,127	0,000	100,057
1019A Kfs 5	stérile	0,055	64,267	0,000	18,783		0,002	0,051	0,003	0,000	0,000	0,444	16,010	0,141	0,000	99,756
1023A Kfs 1	Spd	0,018	63,963	0,000	18,722		0,015	0,000	0,036	0,000	0,020	0,246	15,904	0,797	0,037	99,759
1023A Kfs 2	Spd	0,039	64,246	0,000	18,557		0,000	0,032	0,011	0,000	0,026	0,286	15,911	0,547	0,007	99,662
1023A Kfs 3	Spd	0,076	64,486	0,049	18,640		0,003	0,032	0,039	0,000	0,018	0,293	16,026	0,678	0,005	100,313
1023A Kfs 4	Spd	0,056	64,119	0,005	18,667		0,007	0,000	0,021	0,000	0,000	0,270	16,062	0,670	0,028	99,907
1023A Kfs 5	Spd	0,027	64,283	0,027	18,610		0,003	0,000	0,007	0,000	0,000	0,204	16,108	0,759	0,016	100,045
1030A Kfs 1	Spd	0,009	63,821	0,065	18,483	0,000	0,030	0,000	0,035	0,000	0,172	0,168	16,086	0,358	0,000	99,228
1030A Kfs 2	Spd	0,008	64,020	0,000	18,624	0,011	0,008	0,006	0,000	0,000	0,081	0,208	16,084	0,321	0,022	99,383
1030A Kfs 3	Spd	0,006	64,200	0,000	18,656	0,001	0,012	0,013	0,038	0,000	0,150	0,187	16,136	0,378	0,009	99,784
1030A Kfs 4	Spd	0,000	63,971	0,000	18,547	0,012	0,063	0,041	0,036	0,000	0,126	0,140	15,917	0,470	0,000	99,312
1030A Kfs 5	Spd	0,017	63,752	0,000	18,504	0,012	0,046	0,000	0,029	0,000	0,108	0,188	16,000	0,456	0,000	99,100
1030A FK 6	Spd	0,064	63,898	0,000	18,608	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,349	16,003			98,922
1043A Kfs 1	Spd	0,021	64,679	0,092	18,642		0,006	0,000	0,032	0,000	0,038	0,356	16,154	0,454	0,053	100,527
1043A Kfs 2	Spd	0,032	64,316	0,059	18,625		0,004	0,026	0,005	0,000	0,132	0,291	15,949	0,509	0,035	99,983
1043A Kfs 3	Spd	0,000	64,504	0,000	18,714		0,000	0,022	0,000	0,000	0,051	0,289	16,111	0,406	0,044	100,142
1043A Kfs 4	Spd	0,000	64,147	0,000	18,759		0,000	0,000	0,025	0,000	0,044	0,201	16,179	0,436	0,051	99,841
1043A Kfs 5	Spd	0,041	64,499	0,000	18,812		0,006	0,051	0,030	0,000	0,068	0,383	15,943	0,355	0,044	100,233
1047A Kfs 1	CoTa	0,037	63,787	0,038	18,570		0,005	0,006	0,000	0,000	0,011	0,250	16,081	0,512	0,014	99,311
1047A Kfs 2	CoTa	0,034	63,743	0,011	18,608		0,005	0,067	0,007	0,000	0,044	0,306	15,991	0,456	0,016	99,288
1047A Kfs 3	CoTa	0,066	64,292	0,016	18,803		0,024	0,000	0,000	0,000	0,015	0,371	16,073	0,438	0,021	100,120
1047A Kfs 4	CoTa	0,016	64,119	0,000	18,693		0,015	0,000	0,015	0,000	0,049	0,360	15,899	0,441	0,012	99,619
1047A Kfs 5	CoTa	0,009	64,230	0,000	18,765		0,010	0,000	0,015	0,000	0,027	0,392	15,977	0,411	0,000	99,837
1054A Kfs 1	stérile	0,000	64,455	0,000	18,678		0,000	0,032	0,021	0,000	0,005	0,273	16,397	0,145	0,006	100,012
1054A Kfs 2	stérile	0,027	64,200	0,000	18,567		0,003	0,000	0,003	0,000	0,022	0,287	16,421	0,140	0,001	99,671
1054A Kfs 3	stérile	0,026	64,486	0,022	18,653		0,007	0,022	0,042	0,000	0,000	0,190	16,366	0,182	0,000	99,995
1054A Kfs 4	stérile	0,017	64,616	0,016	18,616		0,003	0,067	0,000	0,000	0,000	0,382	16,162	0,249	0,022	100,150
1054A Kfs 5	stérile	0,001	64,556	0,000	18,774		0,016	0,026	0,000	0,000	0,000	0,323	16,233	0,273	0,000	100,202
1071B Kfs 1	stérile	0,048	64,239	0,059	18,725		0,018	0,029	0,000	0,000	0,000	0,377	16,028	0,022	0,008	99,553
1071B Kfs 2	stérile	0,021	64,342	0,054	18,726		0,013	0,083	0,022	0,000	0,016	0,366	16,166	0,030	0,000	99,838
1071B Kfs 3	stérile	0,000	64,643	0,011	18,819		0,000	0,022	0,008	0,000	0,000	0,338	16,077	0,002	0,002	99,923
1071B Kfs 4	stérile	0,046	64,337	0,000	18,681		0,009	0,006	0,006	0,000	0,022	0,372	16,023	0,058	0,000	99,561
1071B Kfs 5	stérile	0,066	64,416	0,000	18,841		0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,404	15,881	0,051	0,030	99,701
1079A Kfs 1	Brl	0,040	64,260	0,000	18,617		0,006	0,000	0,014	0,000	0,000	0,345	16,146	0,242	0,038	99,708
1079A Kfs 2	Brl	0,066	64,590	0,000	18,716		0,016	0,010	0,000	0,000	0,057	0,213	16,281	0,158	0,000	100,108
1079A Kfs 3	Brl	0,044	64,098	0,000	18,621		0,005	0,006	0,000	0,000	0,031	0,291	16,151	0,204	0,027	99,479
1079A Kfs 4	Brl	0,074	64,453	0,005	18,819		0,011	0,006	0,017	0,000	0,016	0,332	16,236	0,194	0,006	100,171
1079A FK 5	Brl	0,068	64,648	0,000	18,709		0,032	0,000	0,000	0,000	0,040	0,432	16,010	0,233	0,004	100,177

Échantillon 22-SR-XXXX	Pegmatite à	P2O5	Ta2O5	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	BaO	H2O	Na2O	K2O	Rb2O	Cs2O	F	Cl	Total	O=F, Cl	Total
1004A Ms1	Brl	0,023	na	44,895	0,000	33,941	na	0,221	0,004	0,032	4,206	na	0,000	4,373	0,516	9,763	na	na	na	na	97,974	na	97,974
1004A Ms 2	Brl	0,028	na	44,737	0,043	34,111	na	0,242	0,001	0,082	4,231	na	0,000	4,379	0,608	9,690	na	na	na	na	98,151	na	98,151
1004A Ms3	Brl	0,006	na	44,752	0,117	33,890	na	0,243	0,011	0,095	4,669	na	0,000	4,379	0,387	9,893	na	na	na	na	98,443	na	98,443
1004A Ms 4	Brl	0,000	na	44,801	0,053	33,472	na	0,270	0,009	0,076	4,753	na	0,000	4,354	0,395	9,472	na	na	na	na	97,655	na	97,655
1004A Ms 5	Brl	0,032	na	45,084	0,101	34,168	na	0,250	0,010	0,098	4,166	na	0,000	4,399	0,674	9,380	na	na	na	na	98,363	na	98,363
1013A Ms1	Brl	0,000	0,084	46,145	0,312	33,139	0,000	1,667	0,000	0,049	3,816	0,005	0,326	4,106	0,325	9,335	0,090	0,036	0,675	0,009	100,120	0,286	99,833
1013A Ms2	Brl	0,000	0,066	46,168	0,419	32,803	0,041	1,605	0,005	0,057	3,549	0,016	0,236	4,056	0,330	9,833	0,003	0,000	0,757	0,001	99,942	0,319	99,623
1013A Ms3	Brl	0,011	0,074	46,134	0,397	32,794	0,000	1,629	0,000	0,064	3,441	0,000	0,120	4,244	0,271	9,492	0,448	0,091	0,373	0,004	99,587	0,158	99,429
1013A Ms4	Brl	0,035	0,000	45,804	0,539	32,736	0,090	1,635	0,000	0,028	3,322	0,003	0,415	4,170	0,346	9,223	0,269	0,048	0,482	0,007	99,150	0,205	98,945
1013A Ms5	Brl	0,026	0,000	44,226	0,028	35,876	0,018	0,287	0,000	0,023	2,815	0,017	0,147	4,393	0,442	9,788	0,183	0,000	0,022	0,003	98,293	0,010	98,283
1023A Ms1	Spd	0,000	0,000	44,843	0,028	34,341	0,018	0,046	0,000	0,142	3,316	0,020	0,007	4,242	0,350	10,132	0,642	0,001	0,254	0,000	98,384	0,107	98,277
1023A Ms2	Spd	0,043	0,003	45,002	0,028	34,393	0,009	0,034	0,026	0,158	3,152	0,000	0,000	4,218	0,371	9,803	0,829	0,000	0,309	0,006	98,383	0,131	98,252
1023A Ms3	Spd	0,017	0,000	44,825	0,035	34,560	0,000	0,022	0,019	0,144	3,656	0,000	0,007	4,218	0,344	9,633	0,736	0,000	0,319	0,000	98,535	0,134	98,401
1023A Ms4	Spd	0,020	0,000	45,206	0,014	34,849	0,000	0,023	0,000	0,185	3,331	0,000	0,000	4,323	0,256	10,094	0,703	0,000	0,178	0,000	99,182	0,075	99,107
1023A Ms5	Spd	0,039	0,088	44,848	0,000	34,794	0,000	0,046	0,003	0,150	3,228	0,000	0,000	4,348	0,256	9,986	0,689	0,000	0,078	0,010	98,562	0,035	98,526
1030A Ms1	Spd	0,045	0,000	50,582	0,000	26,051	0,000	1,606	0,052	0,193	3,907	0,007	1,062	4,351	0,212	10,977	0,420	0,000	0,066	0,008	99,540	0,030	99,510
1030A Ms2	Spd	0,021	0,000	56,804	0,043	23,832	0,009	0,969	0,109	0,118	2,299	0,000	0,439	4,496	3,021	9,339	0,213	0,000	0,189	0,003	101,907	0,080	101,826
1030A Ms3	Spd	0,041	0,000	44,235	0,143	35,861	0,005	0,041	0,003	0,084	2,500	0,000	0,000	4,363	0,461	10,047	0,972	0,011	0,067	0,022	98,854	0,033	98,821
1030A Ms4	Spd	0,000	0,033	43,989	0,093	35,846	0,000	0,076	0,012	0,113	2,303	0,000	0,000	4,329	0,392	10,070	0,965	0,000	0,100	0,006	98,328	0,044	98,284
1030A Ms5	Spd	0,051	0,016	44,935	0,086	35,459	0,000	0,099	0,003	0,088	2,407	0,003	0,075	4,349	0,241	10,398	0,868	0,035	0,134	0,012	99,260	0,059	99,201
1042A Ms1	Co Ta	0,127	0,085	45,623	0,164	35,902	0,077	0,107	0,002	0,018	2,087	0,025	0,002	4,482	1,022	9,320	0,480	0,000	0,000	0,000	99,524	0,000	99,524
1042A Ms2	Co Ta	0,259	0,000	45,179	0,050	36,371	0,009	0,109	0,011	0,005	1,943	0,000	0,041	4,366	1,047	9,348	0,365	0,000	0,211	0,004	99,315	0,090	99,226
1042A Ms3	Co Ta	0,096	0,000	45,186	0,150	36,693	0,046	0,080	0,018	0,002	1,639	0,015	0,000	4,440	1,302	9,039	0,430	0,013	0,078	0,004	99,231	0,034	99,197
1042A Ms4	Co Ta	0,086	0,000	45,182	0,135	36,702	0,005	0,067	0,003	0,017	1,840	0,005	0,000	4,450	1,260	9,131	0,525	0,005	0,067	0,000	99,480	0,028	99,452
1042A Ms5	Co Ta	0,063	0,000	45,333	0,021	36,528	0,005	0,051	0,000	0,000	2,001	0,000	0,022	4,472	1,192	8,994	0,431	0,000	0,000	0,012	99,125	0,003	99,122
1043A Ms 1	Spd	0,008	0,090	44,514	0,021	33,737	0,000	0,085	0,028	0,181	4,102	0,000	0,022	4,235	0,347	10,577	0,450	0,001	0,231	0,002	98,632	0,098	98,534
1043A Ms 2	Spd	0,046	0,022	44,375	0,035	34,071	0,005	0,096	0,000	0,206	4,029	0,006	0,043	4,173	0,335	10,510	0,412	0,039	0,362	0,007	98,772	0,154	98,618
1043A Ms 3	Spd	0,008	0,000	44,717	0,227	34,139	0,000	0,120	0,010	0,168	4,131	0,009	0,046	4,127	0,275	10,203	0,420	0,054	0,494	0,011	99,159	0,210	98,948
1043A Ms 4	Spd	0,000	0,000	44,672	0,298	33,650	0,000	0,117	0,009	0,196	3,826	0,000	0,036	4,184	0,226	10,278	0,406	0,073	0,331	0,000	98,301	0,139	98,162
1043A Ms 5	Spd	0,060	0,041	44,558	0,482	33,470	0,000	0,124	0,001	0,172	4,260	0,002	0,000	4,053	0,249	10,305	0,433	0,020	0,593	0,008	98,830	0,252	98,579
1047A Ms 1	Co Ta	0,034	0,000	44,800	0,078	33,951	0,000	0,397	0,012	0,103	3,143	0,000	0,000	4,152	0,519	10,114	0,461	0,000	0,410	0,012	98,187	0,175	98,012
1047A Ms 2	Co Ta	0,004	0,000	44,960	0,178	33,698	0,054	0,362	0,003	0,199	3,189	0,014	0,000	4,077	0,363	10,426	0,479	0,000	0,565	0,008	98,577	0,240	98,337
1047A Ms 3	Co Ta	0,014	0,000	45,129	0,164	34,088	0,009	0,376	0,003	0,213	3,366	0,000	0,010	4,049	0,417	10,484	0,461	0,000	0,685	0,007	99,475	0,290	99,185
1047A Ms 4	Co Ta	0,020	0,000	44,732	0,114	34,548	0,000	0,368	0,000	0,122	3,038	0,000	0,000	4,159	0,442	10,151	0,405	0,000	0,443	0,000	98,541	0,187	98,355
1047A Ms5	Co Ta	0,003	0,041	45,073	0,257	34,474	0,000	0,377	0,000	0,173	2,955	0,021	0,000	4,183	0,357	10,210	0,409	0,000	0,433	0,000	98,967	0,182	98,784
1054A Ms 1	stérile	0,032	0,022	45,730	0,086	37,173	0,014	0,195	0,009	0,018	1,116	0,000	0,000	4,450	0,195	10,895	0,188	0,000	0,135	0,004	100,261	0,058	100,203

1054A Ms 2	stérile	0,005	0,052	44,574	0,000	37,463	0,000	0,013	0,000	0,009	0,982	0,000	0,027	4,418	0,216	10,950	0,092	0,000	0,068	0,013	98,883	0,032	98,851
1054A Ms 3	stérile	0,030	0,000	45,316	0,079	37,145	0,000	0,160	0,011	0,033	0,987	0,010	0,010	4,406	0,209	10,903	0,061	0,000	0,158	0,014	99,530	0,070	99,460
1054A Ms 4	stérile	0,014	0,014	44,968	0,000	34,336	0,000	0,172	0,000	0,067	3,794	0,000	0,000	4,394	0,245	10,939	0,093	0,020	0,000	0,023	99,079	0,005	99,074
1054A Ms 5	stérile	0,019	0,000	45,195	0,071	34,709	0,000	0,241	0,035	0,060	3,783	0,009	0,000	4,271	0,253	10,165	0,060	0,012	0,287	0,012	99,183	0,124	99,060
1019A Ms 1	stérile	0,030	0,000	45,335	0,092	35,152	0,000	0,538	0,000	0,067	3,588	0,000	0,000	4,290	0,418	10,053	0,051	0,000	0,331	0,004	99,948	0,140	99,808
1019A Ms 2	stérile	0,036	0,057	45,399	0,000	34,713	0,014	0,529	0,000	0,038	3,443	0,000	0,000	4,293	0,285	10,222	0,000	0,000	0,276	0,007	99,312	0,118	99,194
1019A Ms 3	stérile	0,038	0,000	45,103	0,021	34,505	0,005	0,511	0,000	0,054	3,244	0,000	0,034	4,248	0,359	10,237	0,000	0,008	0,299	0,021	98,687	0,131	98,556
1019A Ms 4	stérile	0,026	0,000	44,990	0,114	34,738	0,000	0,488	0,006	0,016	3,506	0,003	0,000	4,318	0,472	10,365	0,128	0,004	0,210	0,002	99,385	0,089	99,296
1019A Ms 5	stérile	0,026	0,000	45,146	0,071	35,001	0,027	0,479	0,018	0,034	3,264	0,000	0,000	4,280	0,508	9,950	0,046	0,000	0,276	0,042	99,170	0,126	99,045
1071B Ms 1	stérile	0,031	0,000	45,005	0,334	33,381	0,054	0,546	0,000	0,030	4,554	0,000	0,000	4,305	0,265	10,653	0,000	0,000	0,177	0,008	99,342	0,076	99,266
1071B Ms 2	stérile	0,037	0,000	45,123	0,256	32,818	0,000	0,643	0,003	0,020	4,479	0,000	0,000	4,236	0,255	10,600	0,006	0,000	0,265	0,004	98,746	0,112	98,633
1071B Ms 3	stérile	0,039	0,005	45,238	0,299	33,204	0,018	0,655	0,005	0,053	4,773	0,000	0,065	4,283	0,181	10,754	0,072	0,000	0,242	0,011	99,897	0,104	99,792
1071B Ms 4	stérile	0,050	0,150	45,372	0,192	33,112	0,000	0,662	0,000	0,044	4,457	0,000	0,046	4,334	0,344	10,415	0,000	0,000	0,132	0,000	99,310	0,056	99,255
1071B Ms5	stérile	0,056	0,036	44,865	0,199	33,140	0,000	0,702	0,005	0,043	4,637	0,000	0,005	4,221	0,332	9,816	0,003	0,000	0,275	0,022	98,357	0,121	98,236

Échantillom 22-SR-XXXX	Pegmatite à	P2O5	SiO2	TiO2	ZrO2	Al2O3	Cr2O3	Y2O3	MgO	CaO	MnO	FeO	ZnO	Na2O	K2O	Total
1019A Grt 1	stérile	0,041	33,868	0,000	0,054	21,191	0,000	0,000	0,747	0,478	14,338	27,796	0,022	0,000	0,000	98,535
1019A Grt 2	stérile	0,000	34,670	0,029	0,047	20,981	0,000	0,002	0,740	0,403	14,264	28,138	0,069	0,007	0,000	99,351
1019A Grt 3 core	stérile	0,009	33,956	0,000	0,005	20,782	0,000	0,211	0,748	0,449	14,174	28,285	0,075	0,038	0,000	98,733
1019A Grt 3 inter	stérile	0,000	33,980	0,000	0,058	20,993	0,000	0,000	0,760	0,567	14,224	28,012	0,009	0,003	0,000	98,606
1019A Grt 3 bord	stérile	0,000	34,031	0,000	0,005	20,933	0,051	0,089	0,584	0,413	14,809	27,289	0,024	0,024	0,014	98,266
1071B Grt 1 core	stérile	0,035	33,752	0,015	0,005	20,719	0,009	0,028	0,699	0,752	16,517	25,395	0,046	0,004	0,000	97,975
1071B Grt 1 inter	stérile	0,000	33,521	0,068	0,000	20,629	0,009	0,270	0,747	0,730	16,076	25,619	0,004	0,003	0,002	97,677
1071B Grt 1 bord	stérile	0,019	33,905	0,000	0,028	20,851	0,018	0,017	0,641	0,632	16,677	25,228	0,000	0,025	0,006	98,047
1071B Grt 2	stérile	0,000	34,427	0,068	0,000	20,764	0,015	0,121	0,758	0,700	15,526	26,226	0,000	0,022	0,000	98,628
1071B Grt 3	stérile	0,000	33,429	0,000	0,014	20,865	0,000	0,154	0,709	0,647	15,940	25,860	0,000	0,025	0,002	97,646
1054A Grt core	stérile	0,000	34,067	0,000	0,000	20,560	0,000	0,476	0,072	0,677	24,774	18,041	0,135	0,031	0,001	98,833
1054A Grt1 inter	stérile	0,000	34,355	0,101	0,000	20,652	0,043	0,476	0,099	0,641	23,333	19,650	0,097	0,032	0,000	99,478
1054A Grt1 rim	stérile	0,000	34,155	0,000	0,000	20,977	0,024	0,126	0,215	0,745	18,023	24,933	0,049	0,041	0,003	99,291
1054A Grt core	stérile	0,006	33,463	0,029	0,068	20,647	0,000	0,016	0,085	0,681	24,784	18,714	0,011	0,000	0,000	98,505

1054A Grt core	stérile	0,000	34,067	0,000	0,000	20,560	0,000	0,476	0,072	0,677	24,774	18,041	0,135	0,031	0,001	98,833
1054A Grt 2 core	stérile	0,000	33,119	0,053	0,047	20,543	0,040	0,105	0,088	0,714	24,333	18,876	0,025	0,034	0,010	97,985
1079A Grt 1	Brl	0,199	33,535	0,053	0,014	20,029	0,003	0,079	0,247	0,531	16,633	25,821	0,045	0,032	0,000	97,219
1079A Grt 2	Brl	0,169	34,754	0,000	0,033	20,053	0,000	0,070	0,244	0,398	16,665	26,268	0,000	0,027	0,003	98,682
1079A Grt 3	Brl	0,254	34,289	0,053	0,049	20,619	0,000	0,001	0,256	0,396	16,467	26,593	0,142	0,025	0,007	99,151
1079A Grt4	Brl	0,123	34,480	0,062	0,036	20,536	0,000	0,000	0,257	0,432	16,498	26,694	0,008	0,022	0,000	99,149
1079A Grt 5	Brl	0,144	34,269	0,000	0,056	20,519	0,000	0,000	0,257	0,415	16,517	26,255	0,085	0,012	0,014	98,543
1047A Grt 1	Co Ta	0,065	34,588	0,038	0,049	20,555	0,006	0,059	0,148	0,516	21,050	22,640	0,030	0,035	0,000	99,778
1047A Grt 2	Co Ta	0,000	34,569	0,072	0,000	20,565	0,000	0,320	0,124	0,497	20,732	22,443	0,002	0,043	0,000	99,367
1047A Grt 3	Co Ta	0,044	34,421	0,101	0,053	20,536	0,000	0,122	0,118	0,509	21,219	22,179	0,055	0,018	0,000	99,375
1047A Grt 4	Co Ta	0,011	34,905	0,000	0,000	20,474	0,000	0,217	0,097	0,495	21,163	21,902	0,047	0,031	0,001	99,343
1047A Grt 5	Co Ta	0,044	34,655	0,058	0,036	20,703	0,009	0,010	0,142	0,535	20,543	22,781	0,090	0,017	0,000	99,623
1042A Grt 1	Co Ta	0,182	32,802	0,119	0,016	20,843	0,000	0,038	0,044	0,426	21,783	21,639	0,034	0,003	0,000	97,931
1042A Grt 2	Co Ta	0,116	33,812	0,067	0,000	20,760	0,015	0,026	0,046	0,478	24,430	19,343	0,009	0,028	0,004	99,135
1042A Grt 3	Co Ta	0,134	33,519	0,091	0,000	20,902	0,055	0,049	0,042	0,472	25,581	18,164	0,039	0,003	0,002	99,050
1042A Grt 4	Co Ta	0,210	33,224	0,062	0,014	20,875	0,000	0,000	0,020	0,455	26,087	17,446	0,036	0,001	0,000	98,431
1042A Grt 5	Co Ta	0,171	32,817	0,000	0,089	20,891	0,000	0,031	0,025	0,451	26,376	17,657	0,043	0,004	0,002	98,559
1030A Grt 1	Spd	0,024	34,651	0,058	0,000	20,887	0,000	0,127	0,028	0,593	20,634	22,797	0,063	0,005	0,000	99,868
1030A Grt 2	Spd	0,030	34,948	0,000	0,064	20,676	0,012	0,161	0,057	0,599	20,844	22,517	0,000	0,043	0,000	99,953
1043A Grt 1	Spd	0,000	34,609	0,010	0,000	20,795	0,006	0,000	0,008	1,974	21,459	20,870	0,023	0,024	0,001	99,778
1043A Grt 2	Spd	0,017	34,950	0,014	0,070	20,830	0,000	0,000	0,034	1,064	19,170	23,881	0,025	0,019	0,000	100,074
1043A Grt 3(Line) Pt 1	Spd	0,000	34,593	0,014	0,025	20,955	0,030	0,000	0,020	0,974	19,407	23,774	0,018	0,000	0,002	99,814
1043A Grt 3(Line) Pt 2	Spd	0,032	34,514	0,019	0,048	20,711	0,000	0,000	0,019	0,866	22,158	21,009	0,011	0,018	0,007	99,412
1043A Grt 3(Line) Pt 3	Spd	0,002	34,335	0,010	0,024	20,954	0,000	0,021	0,030	0,996	21,909	21,110	0,062	0,012	0,000	99,464
1043A Grt 3(Line) Pt 4	Spd	0,000	34,494	0,116	0,010	20,839	0,030	0,031	0,013	0,962	20,963	22,024	0,000	0,020	0,004	99,506

1043A Grt 3(Line) Pt 5	Spd	0,009	34,445	0,000	0,028	20,794	0,000	0,000	0,005	1,099	19,524	23,503	0,036	0,000	0,013	99,457
------------------------	-----	-------	--------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	-------	-------	-------	--------

Échantillon 22-SR-XXXX	Pegmatite à	K2O	CaO	TiO2	MnO	FeO	Nb2O5	Ta2O5	Total
1054A Co Ta 1	stérile	0,000	0,070	0,707	10,556	9,962	71,742	8,038	101,075
1054A Co Ta 2	stérile	0,000	0,003	1,205	6,213	13,730	70,446	8,733	100,332
1054A Co Ta 3	stérile	0,000	0,000	1,471	6,597	13,662	71,016	7,437	100,183
1054A Co Ta 4	stérile	0,000	0,004	1,535	5,441	14,725	69,878	9,841	101,424
1004A Co Ta 1	Brl	0,000	0,004	2,288	4,767	15,812	68,878	8,918	100,668
1004A Co Ta 2	Brl	0,016	0,015	2,105	4,641	15,178	71,091	8,377	101,424
1030A Co Ta 1	Spd	0,000	0,024	0,748	5,455	12,675	51,335	30,411	100,649
1030A Co Ta 2	Spd	0,001	0,004	0,693	5,559	13,788	57,402	24,110	101,556
1042A Co Ta 1	Co Ta	0,007	0,000	1,414	5,063	14,442	66,637	13,330	100,893
1042A Co Ta 2	Co Ta	0,006	0,000	0,785	5,412	14,922	67,957	11,073	100,154
1047A Co Ta 1	Co Ta	0,000	0,010	0,831	7,459	11,676	69,850	8,805	98,631