

MB 2022-01

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

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

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

Énergie et Ressources
naturelles

Québec 



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

Marc Legault, Ludivine Da Rosa, Flore Parisot et Robin Potvin

MB 2022-01

Avertissement

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

PU-2021-08-1384

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

Pour :

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

Par :

Marc Legault, Ph. D.

Avec la collaboration de :

Ludivine Da Rosa
Flore Parisot
Robin Potvin



Unité de recherche et de service en technologie minérale

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

Novembre 2021

RÉSUMÉ

Ce rapport présente une synthèse des travaux de compilation et de terrain effectués lors de deux stages à l'UQAT au cours de l'été 2021. Ces stages portent sur :

- a) l'évaluation du potentiel en lithium-tantale dans le secteur du lac Simard au Témiscamingue;
- b) des éléments à terres rares (ETR) dans le secteur de l'Outaouais.

Dans le secteur au nord du lac Simard, plusieurs pegmatites montrent des minéralisations. Elles ont été divisées en trois groupes : Li-Cs-Ta ± Be (LCT), Nb-Y-F ± ETR, U, Th, Zr, Ta, Pb (NYF) et Mixte (combinaison des deux groupes précédents). Les dykes minéralisés sont généralement orientés est-ouest et montrent une zonalité interne où la minéralisation se trouve en bordure ou dans le centre quartzeux. Ils semblent représenter les dernières pulsations magmatiques associées à la mise en place du Batholithe du Réservoir Decelles et peuvent être identifiés à l'aide du rapport K/Rb. Les minéralisations en spodumène (Li-Ta) montrent le plus grand potentiel économique vu leurs tailles, leurs teneurs et l'absence de minéraux radioactifs.

En Outaouais, les dykes de carbonatites montrent un enrichissement en ETR ± Nb qui peut être également observé dans les fénites encaissantes. La compilation des données montre une lacune dans les levés géologiques régionaux du secteur, ce qui nuit à l'évaluation du potentiel en ETR. Cependant, les divers affleurements de carbonatite et de fénite compilés permettent de définir trois couloirs d'orientation NE-SW de plus de 15 km de long sur une largeur d'environ 5 km. Le couloir au nord de la ville de Gatineau montre le plus de potentiel en ETR avec la présence : 1) de plusieurs fénites et dykes de carbonatites avec des valeurs indicielles en ETR, 2) d'une vaste zone d'affleurements de fénite et 3) d'une large anomalie de potassium possiblement associée à des fénites non cartographiées.

Les stages à l'été 2022 permettront de mieux caractériser chimiquement et minéralogiquement ces divers types de minéralisations.

Mots-clés : Pegmatite, lithium, Témiscamingue, carbonatite, éléments de terres rares, Outaouais

Table des matières

	Page
Résumé	i
Préface	v
Méthodes de travail	v
Les minéraux critiques et stratégiques	vii
Évaluation du potentiel en lithium-tantale du secteur du lac simard, région du Témiscamingue (F. Parisot)	1
Introduction	1
Contexte géologique.....	1
Problématique.....	4
Résultats	9
Compilation.....	9
Campagne de cartographie et d'échantillonnage	9
Mesures radiométriques	18
Mesures de susceptibilité magnétique.....	18
Conclusion.....	23
Recommandations	23
Évaluation du potentiel en éléments de terres rares associés aux dykes de carbonatites du secteur de l'outaouais (L. Da Rosa)	24
Introduction	24
Contexte géologique.....	24
Problématique.....	26
Résultats	31
Compilation.....	31
Campagne de cartographie et d'échantillonnage	32
Carbonatites.....	34
Fénites	36
Mesures radiométriques	38
Mesures de susceptibilité magnétique.....	38
Conclusion.....	43

Recommandations	43
Bibliographie	44
Annexe A : Paramètres techniques des mesures géophysiques	

Liste des figures

Figure 1. Carte montrant les grands ensembles géologiques du Québec.....	vi
Figure 2. Carte géologique des suites magmatiques de l'Abitibi et du Pontiac	2
Figure 3. Géologie régionale du secteur nord du lac Simard sur fond d'image satellitaire.....	3
Figure 4. Carte de valorisation des MCS du Québec.....	6
Figure 5. Schéma idéalisé d'un champ de pegmatites LCT	8
Figure 6. Carte de localisation des indices répertoriés dans le cadre de cette étude	10
Figure 7. Distribution des analyses géochimiques compilées	12
Figure 8. Carte de localisation des 49 affleurements visités et décrits par une géofiche	13
Figure 9. Faciès du Batholithe du Réservoir Decelles.....	14
Figure 10. Photographie de dykes de pegmatites	17
Figure 11. Graphique de boîte à moustache des valeurs de spectromètre à rayon gamma	19
Figure 12. Graphique de boîte à moustache des valeurs de spectromètre à rayon gamma	20
Figure 13. Graphique de boîte à moustache pour les valeurs de susceptibilité magnétique.....	21
Figure 14. Graphique du débit de dose en fonction de la susceptibilité magnétique	22
Figure 15. Carte géologique du sud-ouest du Québec	25
Figure 16. Illustration montrant la répartition des ressources minérales.....	27
Figure 17. Localisation des cinq indices d'ÉTR associés à des carbonatites	29
Figure 19. Carte de localisation des 28 affleurements visités.....	33
Figure 20. Photographies de carbonatites	35
Figure 21. Photographies de fénites.....	37
Figure 22. Graphique de boîte à moustache	39
Figure 23. Graphique de boîte à moustache	40
Figure 24. Levés géophysiques aériens couvrant les FRN	41
Figure 25. Graphique de boîte à moustache	42

Liste des tableaux

Tableau 1.	Liste des MCS du Québec.....	viii
Tableau 2.	Tableau de classification des différents types de pegmatites.....	4
Tableau 3.	Localisation des indices du secteur.....	11
Tableau 4.	Localisation des indices d'ÉTR du secteur.....	29
Tableau 5.	Compilation des données minéralogiques, géochronologiques et géochimiques des carbonatites.....	30

PRÉFACE

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

Afin de donner des expériences de stage appliqué dans le domaine de l'évaluation du potentiel pour les minéraux critiques et stratégiques (MCS), l'Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale (URSTM) de l'UQAT, le MERN et Éléments08, le centre d'excellence sur les métaux stratégiques, ont lancé un projet de deux stages sur les MCS par année pour une durée de 4 ans. Cette année, les stages se sont déroulés du 25 mai au 27 août 2021 et ont porté sur l'évaluation du potentiel du lithium-tantale dans le secteur du lac Simard au Témiscamingue (F. Parisot) et des éléments à terres rares (ÉTR) dans le secteur de l'Outaouais (L. Da Rosa) (*figure 1*). Ce rapport présente une synthèse de leurs travaux.

Méthodes de travail

Les stages ont été divisés en une première partie de compilation des travaux historiques sur le secteur d'étude suivi d'une deuxième partie de terrain (11 au 22 juillet en Outaouais et 24 juillet au 8 août au lac Simard) et de préparation des échantillons pour les analyses pétrographiques et chimiques.

Un travail de compilation de données géoscientifiques existantes a été réalisé pour faire l'état des connaissances et mieux préparer la campagne d'échantillonnage. Pour ce faire, un travail bibliographique préparatoire a été effectué sur les documents traitant du secteur étudié à l'aide d'une revue de mémoires, de thèses, d'articles scientifiques, d'EXAMINE pour les rapports géologiques des compagnies minières (travaux statutaires) et du MERN ainsi que du SIGEOM à la carte pour les données vectorielles.

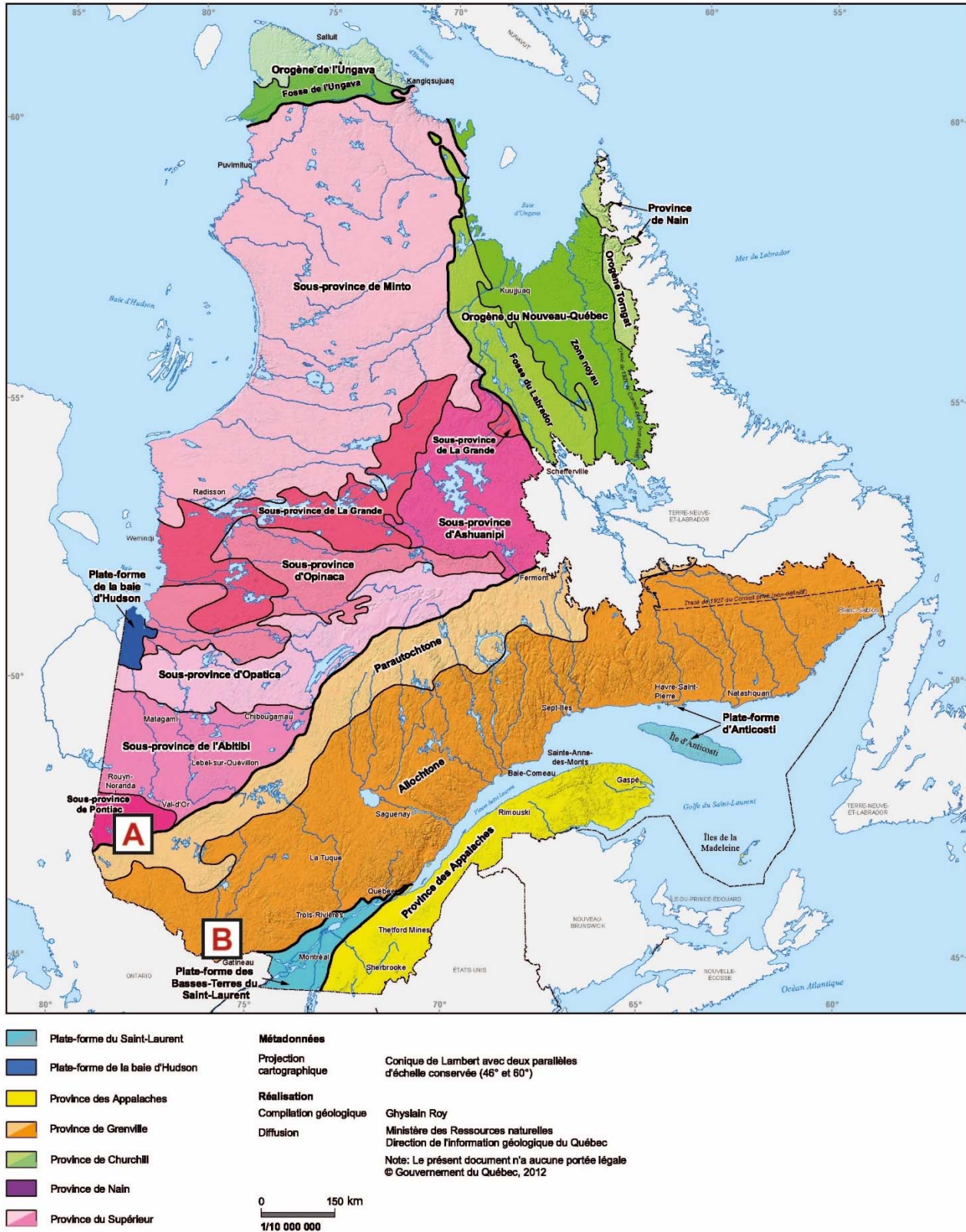


Figure 1. Carte montrant les grands ensembles géologiques du Québec avec la localisation des projets de stage. A – Lac Simard; B – Outaouais. Modifiée de MERN (2012).

Les données géochimiques disponibles dans ces rapports ont été réunies dans une base de données Excel et seront téléchargées dans le SIGEOM à une date ultérieure. Les indices connus ont été visités en priorité, le reste des affleurements visités a été choisi afin de couvrir de manière homogène les secteurs, dans la limite des conditions d'accès et de la présence d'affleurements. Le tout afin de mieux définir le potentiel des secteurs visités. Durant cette campagne, la géologie du secteur fut décrite sur des géofiches. Les échantillons collectés subiront une étude complète (minéralogie, analyses chimiques et datation) en partie lors de stages en 2022. De plus, la radioactivité de la roche a été mesurée directement sur les affleurements à l'aide d'un spectromètre à rayon gamma RS-125 de Radiation Solutions Inc. Par la suite, des mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons collectés à l'aide de l'appareil KT-10 de Terraplus. Toutes ces mesures seront incorporées aux géofiches. Les paramètres techniques des mesures géophysiques sont indiqués à l'*annexe A*.

Les minéraux critiques et stratégiques

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

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

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

¹ : Produit transformé comme substance principale.

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

³ : Projet de mise en valeur minière.

⁴ : Projet de transformation.

Évaluation du potentiel en lithium-tantale du secteur du lac Simard, région du Témiscamingue (F. Parisot)

Introduction

Cette section du document présente un résumé des travaux effectués dans le cadre du projet de fin d'études sur l'évaluation du potentiel en lithium et tantale du secteur nord du lac Simard, dans la région du Témiscamingue. L'objectif est de faire le point sur les connaissances existantes sur le secteur et de les compiler afin de planifier une campagne d'échantillonnage et des travaux futurs.

Contexte géologique

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

Les plutons présents dans la région sont généralement de composition granodioritique, monzogranitique et tonalitique (Hocq et Verpaelst, 1994). Dans le secteur étudié, on trouve notamment le Batholite du lac Simard (BLS) et le Batholite du Réservoir Decelles (BRD) (SIGÉOM, 2021) (*figure 3*). Centré sur le lac Simard, on trouve le batholite du même nom, composé de monzonite, monzodiorite, diorite et syénite (Tarnocai, 1997). Il est de nature alcaline (Feng et Kerrich, 1992) et est daté à 2686 Ma (Machado et al., 1991). Au nord du lac, on trouve le BRD, composé essentiellement de granite et de granodiorite (Rive, 1994). Il est peralumineux et est daté entre 2651 et 2658 Ma (Feng et Kerrich, 1991). Sur la rive nord du lac Simard, près du contact entre les deux batholites, se trouve une pléthore de dykes de pegmatites de taille variable (entre 1 et 20 m d'épaisseur) associés à des indices de métaux rares, dont plusieurs MCS (Li, Ta, Nb, ÉTR) (Perron et Labranche, 2017).

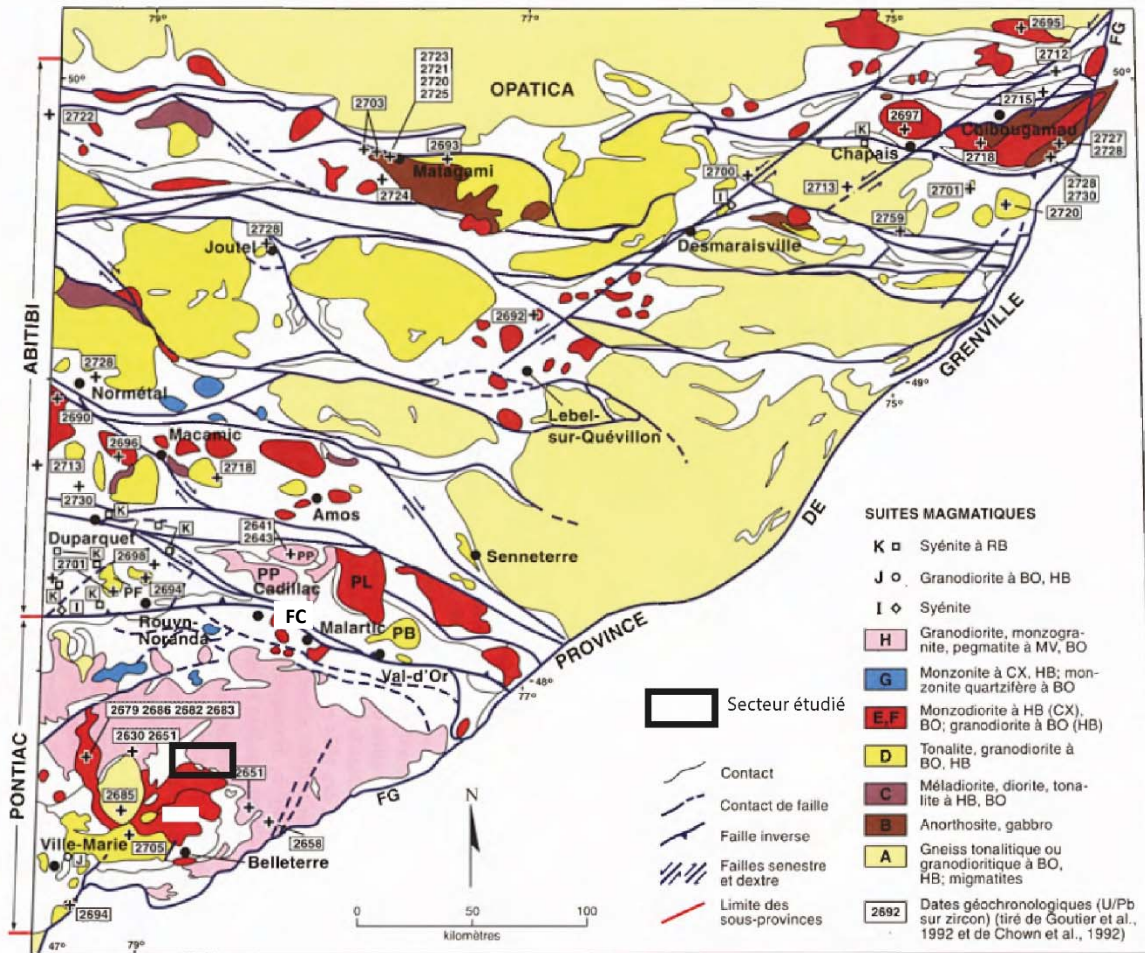


Figure 2. Carte géologique des suites magmatiques de l'Abitibi et du Pontiac de Hocq et Verpaest (1994).
 Plutons : PF : pluton de Flavrian ; PB : pluton de Bourlamaque ; PL : pluton de Lacorne ; PP : pluton de Preissac.
 Abréviations : BO : biotite ; CX : clinopyroxène ; HB : hornblende ; MV : muscovite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

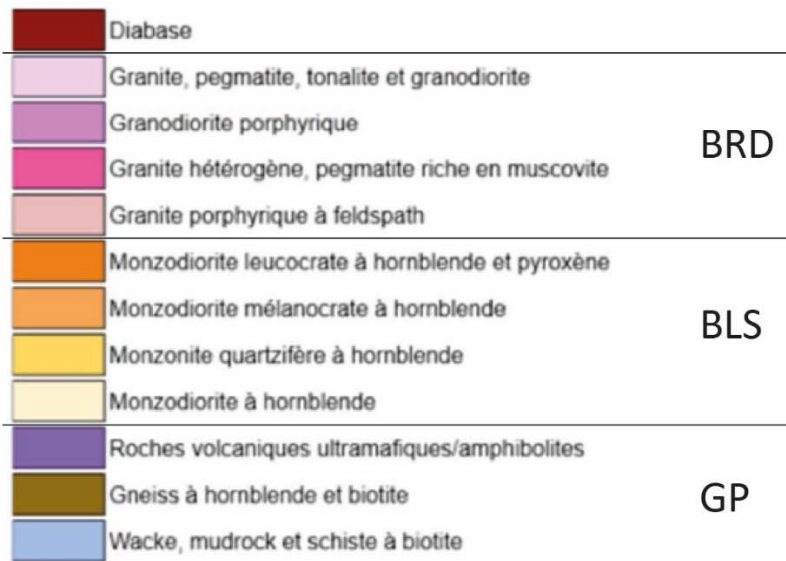
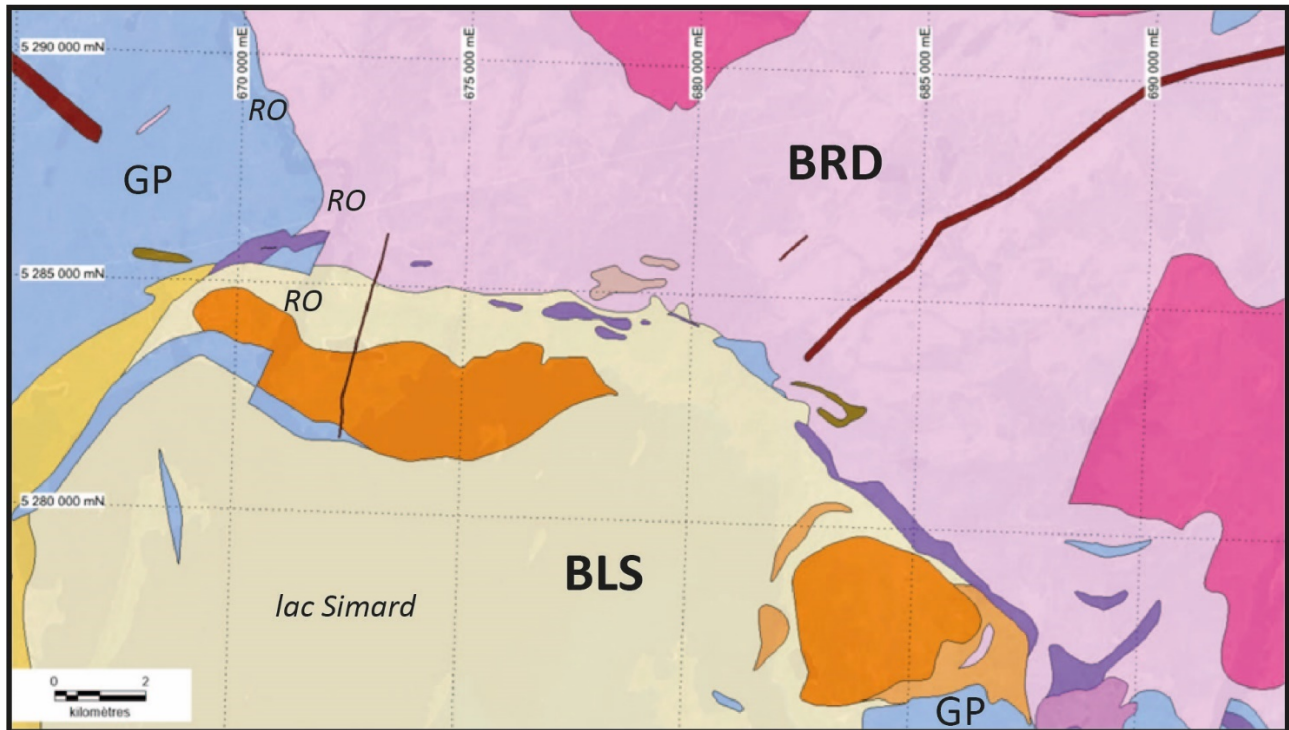


Figure 3. Géologie régionale du secteur nord du lac Simard sur fond d'image satellitaire. Tirée du SIGEOM (2021).
 BLS : Batholite du lac Simard ; BRD : Batholite du Réservoir Decelles ; GP : Groupe de Pontiac. RO : Rivière des Outaouais. UTM NAD 83 – zone 17.

Deux familles de pegmatites sont distinguées dans le secteur (Gobeil, 1982) :

- Les pegmatites simples, ou pegmatites à muscovite, qui présentent une orientation générale nord-sud et ne sont pas minéralisées;
- Les pegmatites complexes qui présentent une zonation du mur au cœur avec un assemblage microcline-quartz dans la zone externe, microcline-micas dans la zone intermédiaire, et une zone interne à quartz \pm spodumène. Ces pegmatites d'orientation générale est-ouest sont minéralisées en spodumène (Li), colombo-tantalite (Nb-Ta) et parfois béryl (Be) et uranium.

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

Problématique

L'objet de ce stage porte sur les métaux stratégiques tels que le lithium (Li) et le tantale (Ta). Une source importante de Li-Ta à l'échelle mondiale sont les pegmatites (26% du lithium total; Bradley *et al.*, 2017) qui se présentent généralement sous la forme de dykes plurimétriques. Bien qu'aucune exploitation de lithium ne soit présentement en opération au Québec, il existe plusieurs projets avancés, dont l'ancienne mine North American Lithium et les projets Authier, Wabouchi, Rose, Moblan et James Bay (*figure 4*). Cependant, il existe d'autres secteurs moins connus qui présentent également un potentiel tel que le secteur du lac Simard où plusieurs indices de Li et Ta ont été identifiés.

Les pegmatites ont été classées par Černý et Ercit (2005) en fonction de leur profondeur de mise en place, de leur minéralogie et des métaux associés (*tableau 2*). Cette classification permet de voir que les pegmatites minéralisées se mettent en place surtout en bordure des intrusions associées au faciès des schistes verts supérieurs à amphibolite moyen.

On y retrouve deux associations métallifères :

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

Ces deux types de minéralisation sont présents dans le secteur du lac Simard ce qui augmente son intérêt, car des secteurs restreints où ces deux types de minéralisation sont présents ont été peu étudiés en détail (Ercit, 2005).

Tableau 2. Classification des différents types de pegmatites. L'association chimique des familles de pegmatite à éléments rares est spécifiée.
 LCT = Li-Cs-Ta; NYF = Nb-Y-F ± ÉTR, U, Th, Zr, Ta, Pb. Modifié de Jébrak et Marcoux (2008).

Type	Conditions métamorphiques des roches hôtes	Liaison avec granites parents	Minéraux majeurs	Eléments mineurs	
Pegmatites abyssales	faciès granulite à amphibolite supérieur 4-9 kbar (> 11 km) 700-800 °C	rare, association éventuelle avec granite migmatitique	quartz, feldspaths (microcline)	minéralisation rare à faible U, Th, Zr, Nb, Ti, Y, terres rares, Mo; B et Be rares	
Pegmatites à muscovite	faciès amphibolite supérieur 5-8 kbar (7-11 km) 580-650 °C	rarement visible, bordure et périphérie de corps anatectiques	muscovite, feldspaths, quartz	minéralisation absente à rare à U, Th, Nb, Ta, Zr, Ti	
Pegmatites à éléments rares	faciès amphibolite moyen à schistes verts supérieur 2-4 kbar (3,5-7 km) 500-650 °C	périphéries d'intrusions, rarement intérieur des intrusions	quartz, feldspath (albite, microcline), muscovite, biotite	minéralisation rare à abondante soit à Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Hf, Nb, Ta, B, P, F soit à Be, Y, terres rares, U, Th, F et Nb > Ta	LCT NYF
Pegmatites miarolitiques (gemmifères)	faciès schistes verts à contexte subvolcanique 1-2 kbar (1,5-3,5 km) < 500 °C	intérieur ou bordure d'intrusions plutoniques à subvolcaniques	quartz, feldspath, muscovite, biotite	minéralisation pauvre en B, Be, Li, Ta > Nb, F ou pauvre en Be, Y, terres rares, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta	

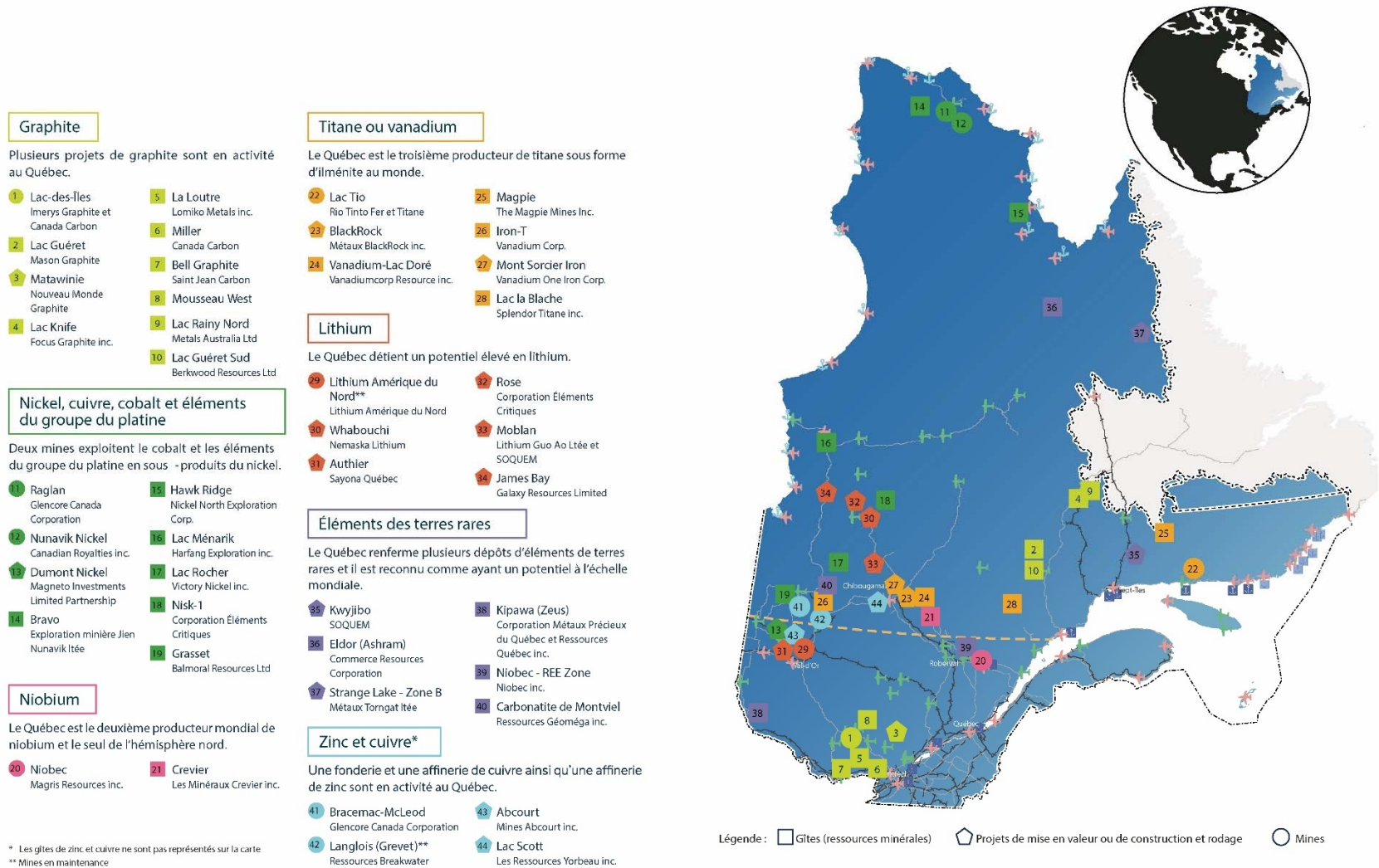


Figure 4. Carte de valorisation des MCS du Québec : gîtes, projets de mise en valeur et mines. Les projets de lithium sont symbolisés en rouge, tandis que les gisements d'ÉTR sont en mauve. Tirée de MERN (2020).

Les pegmatites de type LCT sont caractérisées par la présence, surtout, de spodumène (pyroxène) dans les gisements du Québec et beaucoup moins de la lépidolite (mica) et de la pétalite (feldspath). Les pegmatites de type LCT contiennent également des minéraux accessoires tels que la colombite-tantalite et le béryl (Gourcerol *et al.*, 2019).

Les pegmatites de type 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, 2012).

Selon Černý et Ercit (2005), les pegmatites de type LCT se formeraient dans un contexte compressif issues de plutons parents péralumineux, tandis que les pegmatites NYF se formeraient plutôt en contexte extensif via des plutons parents submétalumineux à métalumineux ou peralcalins. On note également la présence de pegmatites NYF associées à des terrains à haut faciès métamorphique (\geq amphibolite supérieur) sans aucun lien spatial avec un pluton cogénétique (Ercit, 2005; Müller *et al.*, 2017). De plus, on observe des pegmatites mixtes LCT-NYF, qui peuvent avoir plusieurs origines dont la contamination de magma par la digestion de roches supracrustales (Černý et Ercit, 2005).

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

En effet, dans la plupart des cas, on observe une variation chimique des pegmatites de type LCT en fonction de l'éloignement au pluton parent, avec des pegmatites stériles au contact et à l'intérieur du pluton, et des pegmatites riches en Li, F, P et autres éléments rares à caractère incompatible dans les zones les plus distales (Černý, 1991).

Cette zonation chimique s'accompagne d'une zonation minéralogique, avec des pegmatites à deux micas proche du pluton, et des pegmatites à spodumène, lépidolite, béryl et colombo-tantalite pour les plus éloignées du pluton (Müller et al., 2017) (Figure 5).

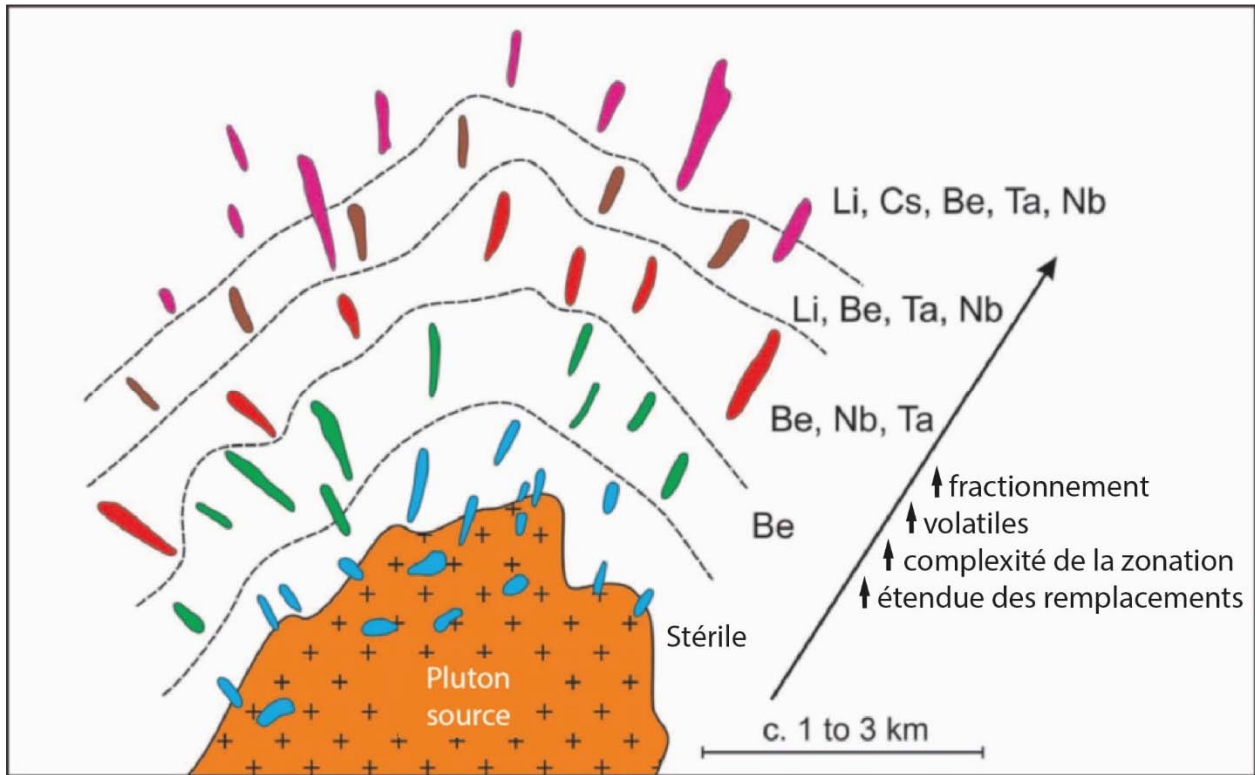


Figure 5. Schéma idéalisé d'un champ de pegmatites LCT illustrant la zonation autour du pluton parent. Les pegmatites stériles sont près ou à l'intérieur du pluton, tandis que les pegmatites enrichies en Li, Cs, Be, Ta, Nb sont plus éloignées. Modifiée de Müller et al. (2017).

Des rapports tels que K/Rb, K/Cs, Nb/Ta, Mg/Li et Zr/Hf sont les plus efficaces pour refléter le degré de fractionnement de la pegmatite (Selway et al., 2005; Ballouard et al., 2016; Steiner, 2019). Les pegmatites de type NYF ne montrent généralement pas une telle zonation à l'échelle régionale (Černý, 1991).

Résultats

Compilation

La compilation de données géologiques sur le secteur a permis de mettre en évidence la présence de 16 indices de Li, Be, Nb, Ta, U et autres éléments. Ces indices, tels que répertoriés dans le SIGEOM (11) et les travaux des compagnies minières (5), sont représentés dans la *figure 6* et le *tableau 3*.

La base de données contient la géochimie de plus de 750 échantillons. Cependant, la plupart de ces analyses ne sont que partielles, généralement restreintes aux métaux traces et rares. Plusieurs éléments dont les majeurs et quelques éléments traces ne sont que rarement analysés, ce qui complique l'évaluation du potentiel du secteur tel qu'illustré à la *figure 7*.

La campagne d'échantillonnage et les analyses chimiques et minéralogiques qui vont être réalisées permettront une meilleure répartition spatiale des données et une meilleure connaissance des roches du secteur (*figure 8*).

Campagne de cartographie et d'échantillonnage

Durant la campagne d'échantillonnage, quarante-neuf (49) géofiches ont été complétées dont plusieurs sur les indices connus du secteur (*figure 8*). Un échantillon de pegmatite contenant de la colombo-tantalite a été collecté sur l'indice Viau-Dallaire et fut acheminé à Don Davis de l'Université de Toronto pour une datation isotopique.

Dans la partie nord, les roches rencontrées dans le BRD correspondent essentiellement à des granites blanc rosé à biotite-muscovite, et parfois à grenat et à magnétite, ayant un grain fin à moyen, évoluant vers des faciès pegmatitiques de composition minéralogique similaire. Ces faciès pegmatitiques ne contiennent pas de minéraux d'intérêt tels que le spodumène, le béryl et la colombo-tantalite (*Figures 9A, B et D*). Ces granites présentent localement des cristaux de magnétite souvent associés à une plus forte radioactivité. De nombreuses enclaves de paragneiss sont également présentes (*figure 9B*).

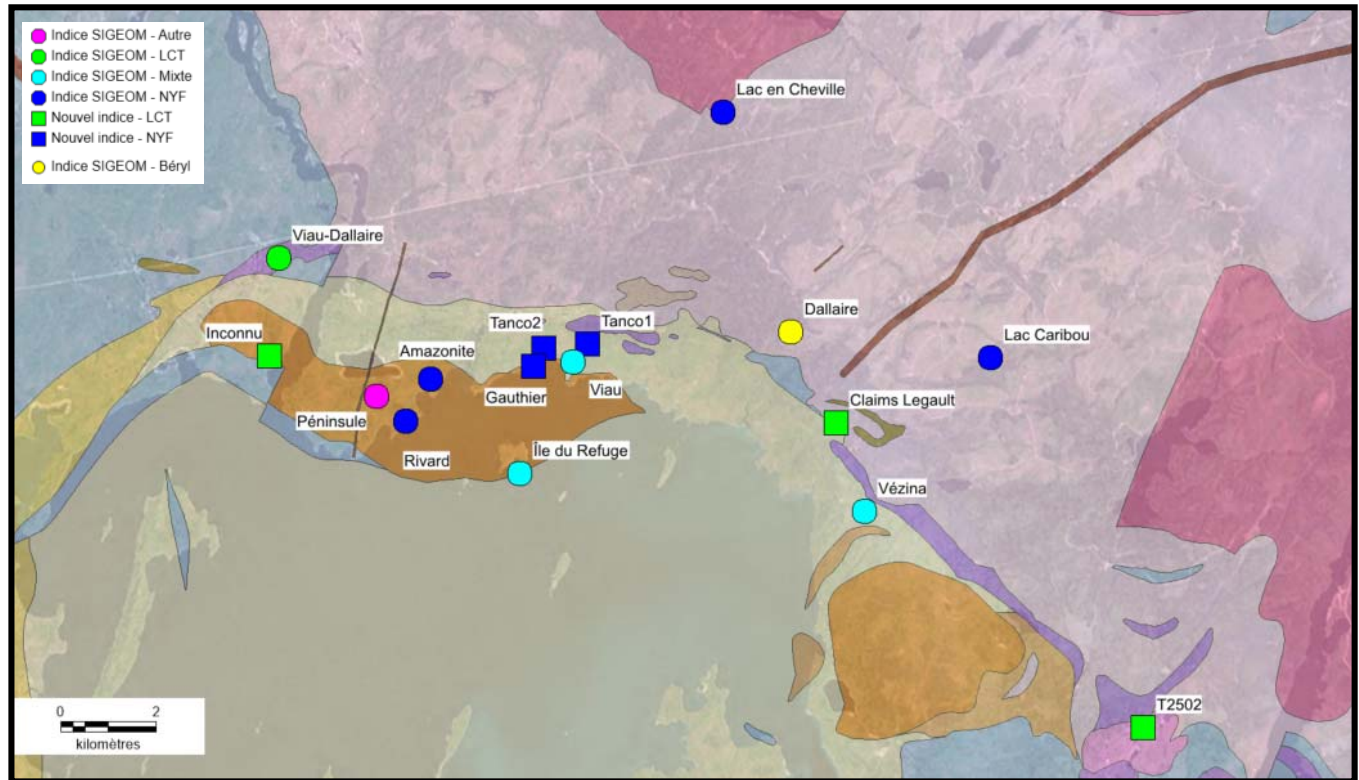


Figure 6. Carte de localisation des indices répertoriés dans le cadre de cette étude. Aucune analyse géochimique n'est présentement disponible pour l'indice Dallaire. Carte géologique tirée du SIGEOM (2021) sur fond d'image satellitaire. LCT = Li-Cs-Ta; NYF = Nb-Y-F ± ÉTR, U, Th, Zr, Ta, Pb. Même légende que la figure 3.

Tableau 3. Localisation des indices du secteur et liste des éléments dont la valeur est supérieure au seuil anormalique¹ défini par le MERN (2021). Aucune analyse géochimique n'est présentement disponible pour l'indice Dallaire. UTM NAD 83 – zone 17.

Indice	Estant	Nordant	Type	Valeurs indicielles
Viau-Dallaire	670638	5285750	LCT	Cs Li Ta
Viau	676869	5283766	Mixte	Be Cs Li Nb Ta Th U
Vézina	683086	5280828	Mixte	Ag ÉTR Li Mo Nb Pb Ta Th U Y Zr
Ile du Refuge	675837	5281404	Mixte	Be Cs Nb
Rivard	673394	5282413	NYF	Ag ÉTR Nb Pb Th U Y
Péninsule	672765	5282920	Autre	U
Amazonite	673891	5283311	NYF	Cs ÉTR Nb Ta Th U
Lac en Cheville	679864	5289077	NYF	Ag Pb U
Lac Caribou	685644	5284133	NYF	Mo U
Gauthier	676048	5283645	NYF	Nb Ta
Inconnu	670502	5283700	LCT	Li
Tanco1	677178	5284154	NYF	Nb Ta
Tanco2	676252	5284028	NYF	Nb Ta
T2502	689089	5276497	LCT	Cs Li
Claims Legault	682442	5282667	LCT	Be Cs Li
Dallaire	681426	5284542	Béryl	?

¹ Ag = 5 ppm ; Be = 360 ppm ; Cs = 100 ppm (non définie par MERN; correspond à la limite de valeur anormale dans feldspath potassique dans pegmatite à métaux rares de Selway et al. (2005)); ÉTR = 1700 ppm (somme des ÉTR); Li = 1160 ppm; Mo = 600 ppm; Nb = 350 ppm; Pb = 3000 ppm; Ta = 164 ppm; Th = 440 ppm; U = 425 ppm; Y = 790 ppm; Zr = 3700 ppm.

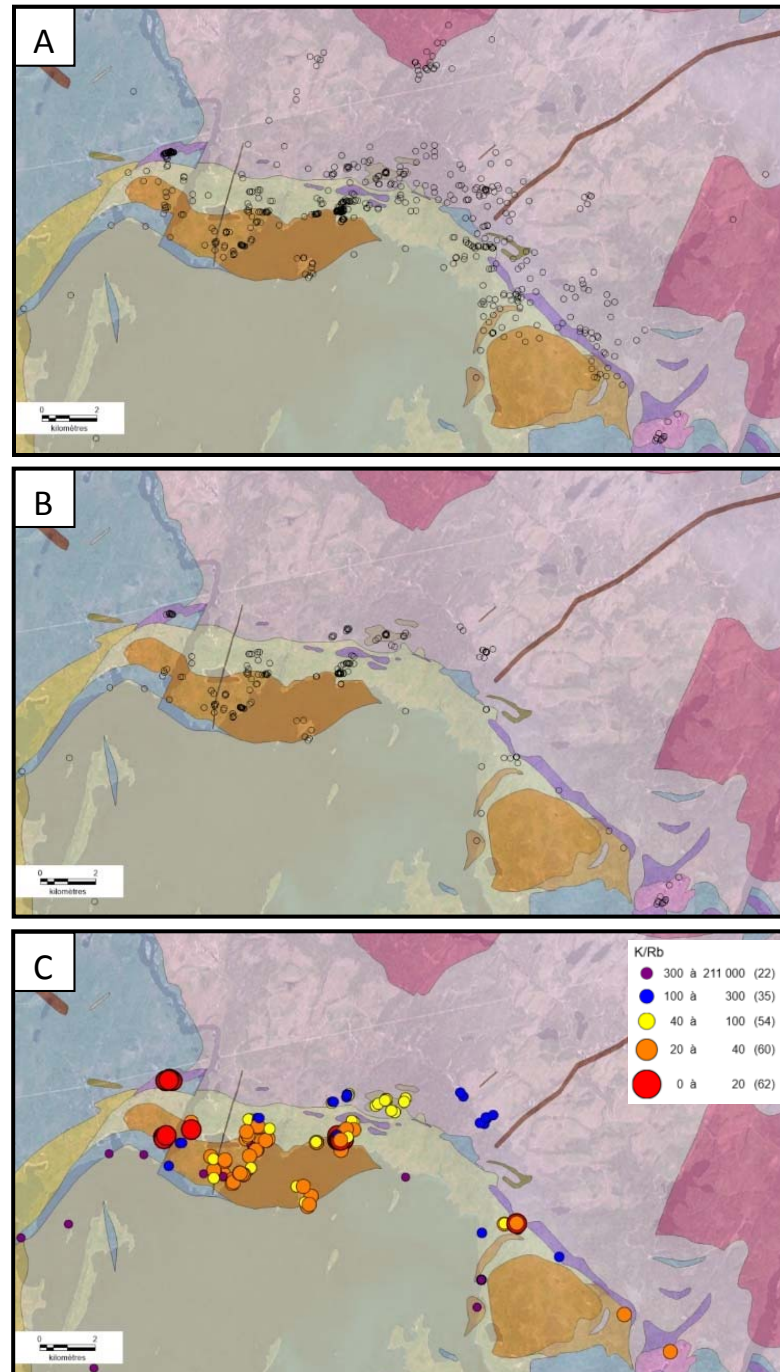


Figure 7. Distribution des analyses géochimiques compilées. A) Carte des analyses compilées sur le secteur représenté (n=678). B) Carte des analyses compilées provenant d’affleurement et identifiées comme des intrusions felsiques ou intermédiaires (n=264). C) Carte du rapport K/Rb provenant des analyses de la figure précédente (n=233). Notez que les valeurs inférieures à 20 coïncident avec des indices de lithium (voir figure 6). Les analyses provenant de forages n’ont pas été compilées. Carte géologique tirée du SIGEOM (2021) sur fond d’image satellitaire. Même légende qu’à la figure 3.

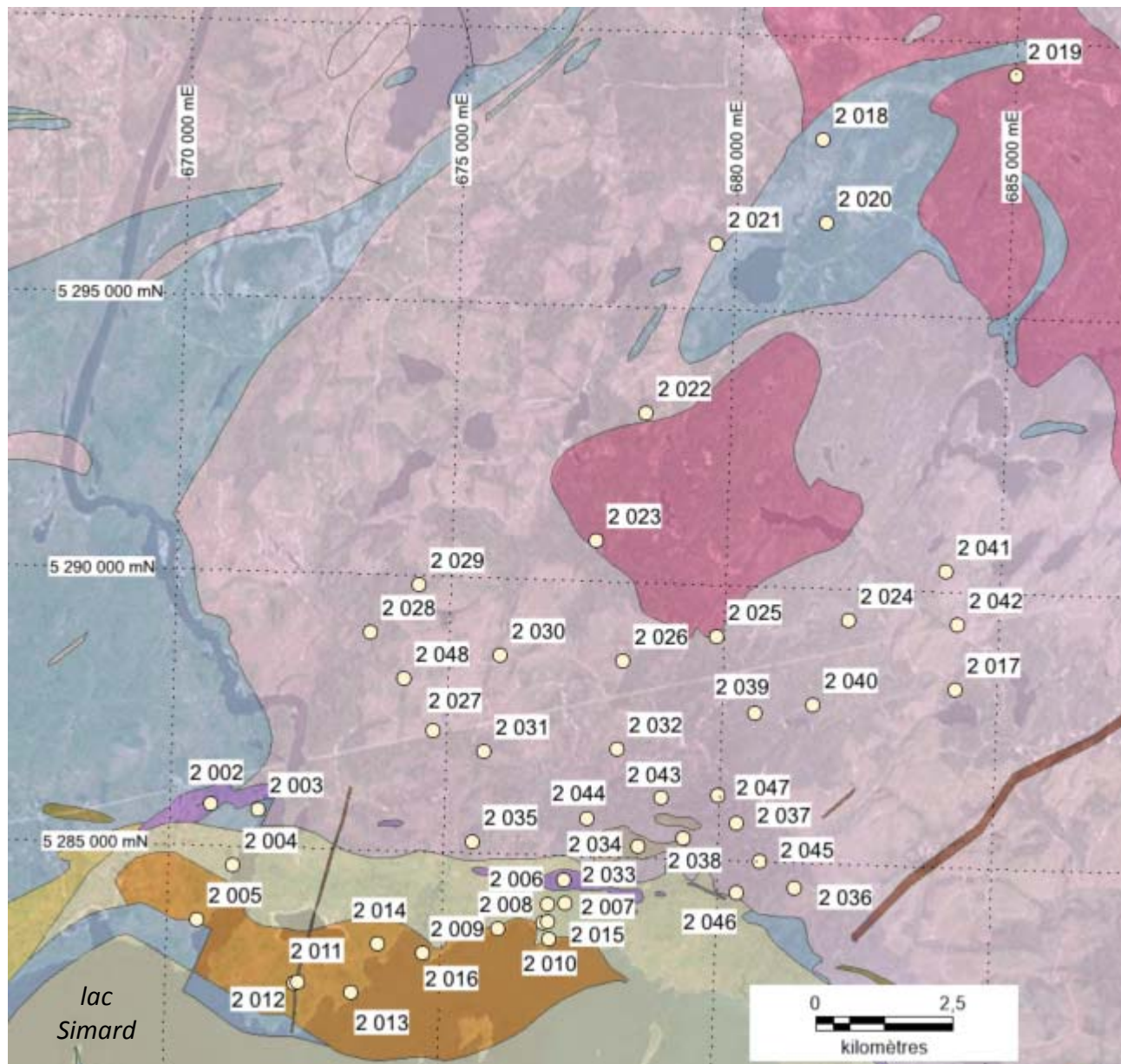


Figure 8. Carte de localisation des 49 affleurements visités et décrits par une géofiche 2021-FP-XXXX. Carte géologique tirée du SIGEOM (2021) sur fond d'image satellitaire. Même légende qu'à la figure 3.

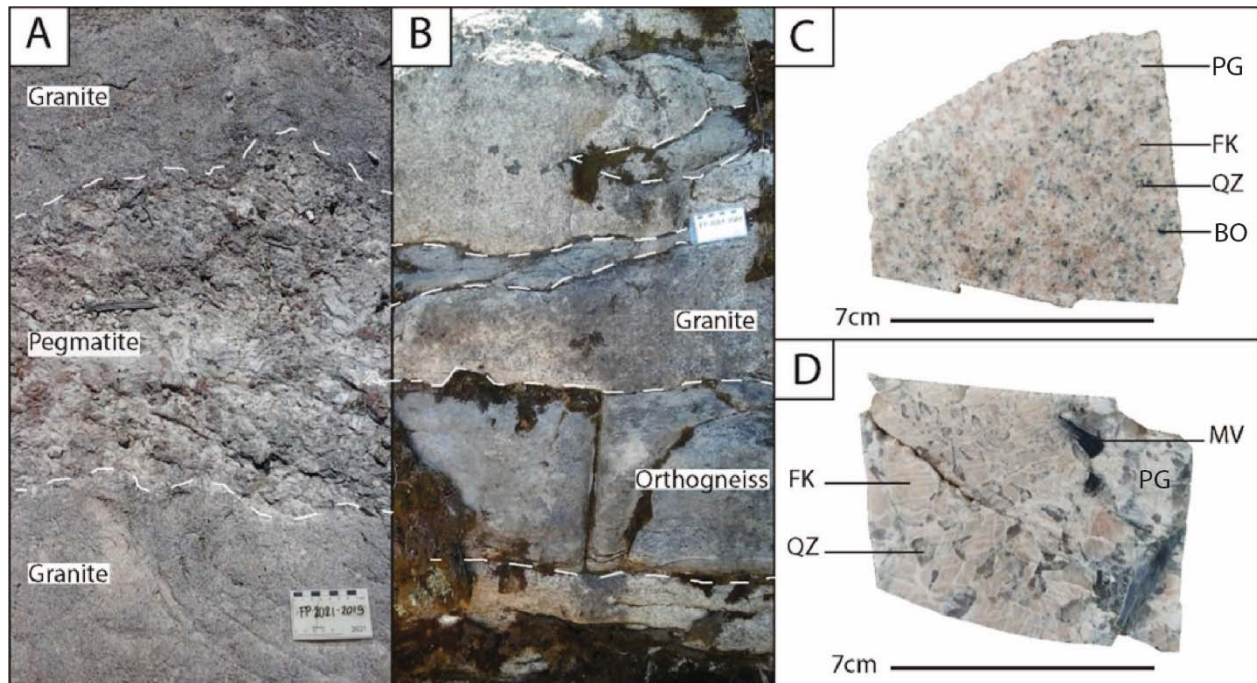


Figure 9. Faciès du Batholithe du Réservoir Decelles. A) Contact graduel entre le granite et la pegmatite stérile dans le BRD. Affleurement 2021-FP-2019. B) Enclaves d'orthogneiss dans le BRD. Affleurement 2021-FP-2020. C) Photographie d'une plaque de granite équi-granulaire du BRD (affleurement 2021-FP-2017A). D) Photographie d'une plaque de pegmatite stérile du BRD (affleurement 2021-FP-2036A). Abréviations : PG = plagioclase ; FK = feldspath potassique ; QZ = quartz ; BO = biotite ; MV = Muscovite. Voir figure 8 pour la localisation des affleurements.

Les dykes de pegmatites sont uniquement visibles à l'extrême sud du pluton, dont notamment l'indice Dallaire qui représente l'indice de béryl le plus au nord (*figure 6*). Les autres dykes de pegmatites minéralisées sont localisés dans le BLS et dans les métasédiments du Groupe de Pontiac dans le cas de l'indice Viau-Dallaire (*figure 6*). Il est également intéressant de noter l'association spatiale de plusieurs des indices avec les roches volcaniques ultramafiques qui se retrouvent en bandes discontinues au contact entre le BLD et le BRD (*figure 6*). Du spodumène a été observé dans les pegmatites des indices Viau-Dallaire, Viau, Tanco et Inconnu. Le minéral est notamment associé au cœur quartzeux, dans lequel il peut atteindre une taille importante, parfois métrique à l'indice Viau (*figure 10A*). Il présente généralement une couleur vert pâle, sauf à l'indice Viau où il peut également être rose ou blanc (*figures 10B et C*).

Du spodumène a également été décrit sur l'indice Claims Legault (Grenier et Sansfaçon, 2010). Cependant cet indice n'a pas pu être visité. Les indices Viau-Dallaire et Viau peuvent être suivis sur des dizaines de mètres, voire des centaines de mètres en surface et en forage, en plus de présenter des teneurs intéressantes ce qui démontre clairement que ces indices ont le plus grand potentiel économique du secteur.

La colombo-tantalite a également été observée sur les indices Viau-Dallaire et Viau, où les cristaux sont associés aux feldspaths (*figure 10C*). Compte tenu de la taille généralement submillimétrique (<1 mm) du minéral et de sa couleur (noir similaire à la phlogopite), il est relativement difficile à observer à l'œil nu et n'a donc pas été vu sur d'autres affleurements (*figure 10D*).

Cependant la colombo-tantalite a été décrite sur les indices Tanco, Amazonite, ainsi que sur l'Île du Refuge qui n'a pas été visitée (Fleury, 2013). Sur l'indice Amazonite, le niobium est associé à des poches métriques radioactives localisées dans une pegmatite blanche à feldspath, quartz et amazonite (Fleury, 2013). Un affleurement de pegmatite sur le rivage du lac Simard (affleurement 2021-FP-2016; *figure 8*) présente également des cristaux d'amazonite (*figure 10E*). L'affleurement montre également un faciès granitique à grains fins avec une poche fortement radioactive.

Plusieurs indices d'uranium se situent dans le secteur. Toutes les zones radioactives rencontrées sur le terrain ne forment que de rares poches (<1 – 2 m de diamètre) dans les dykes de pegmatites. La minéralisation à l'indice Rivard consiste en une zone au sein d'une pegmatite à quartz et feldspaths où des minéraux radioactifs sont présents. Un agrégat uraninite-pyrochlore pluricentimétrique, décrit et identifié au MEB par Fleury et Leclerc (2008), a pu être observé (*figure 10F*).

L'indice Péninsule consiste en des diaclases radioactives dans le secteur d'un dyke de diabase. La radioactivité sporadique semble localisée uniquement dans les diaclases dans la monzodiorite encaissante (*figure 10G*).

À l'indice Lac en Cheville et Lac Caribou, la minéralisation est décrite par Grenier et Hallé (2008) comme étant sous forme de cristaux d'uraninite millimétriques encaissés dans une pegmatite de composition granitique. L'indice Lac en Cheville a été visité. La zone radioactive est concentrée dans une poche de 50 cm de large qui a été dynamitée. Tous ces indices associés à des poches radioactives sont d'intérêt économique faible compte tenu de leur ampleur restreinte, leur gestion environnementale éventuelle et du fait que ce type de minéralisation ne forme que très rarement des gisements exploitables en MCS (Linen, 2012).

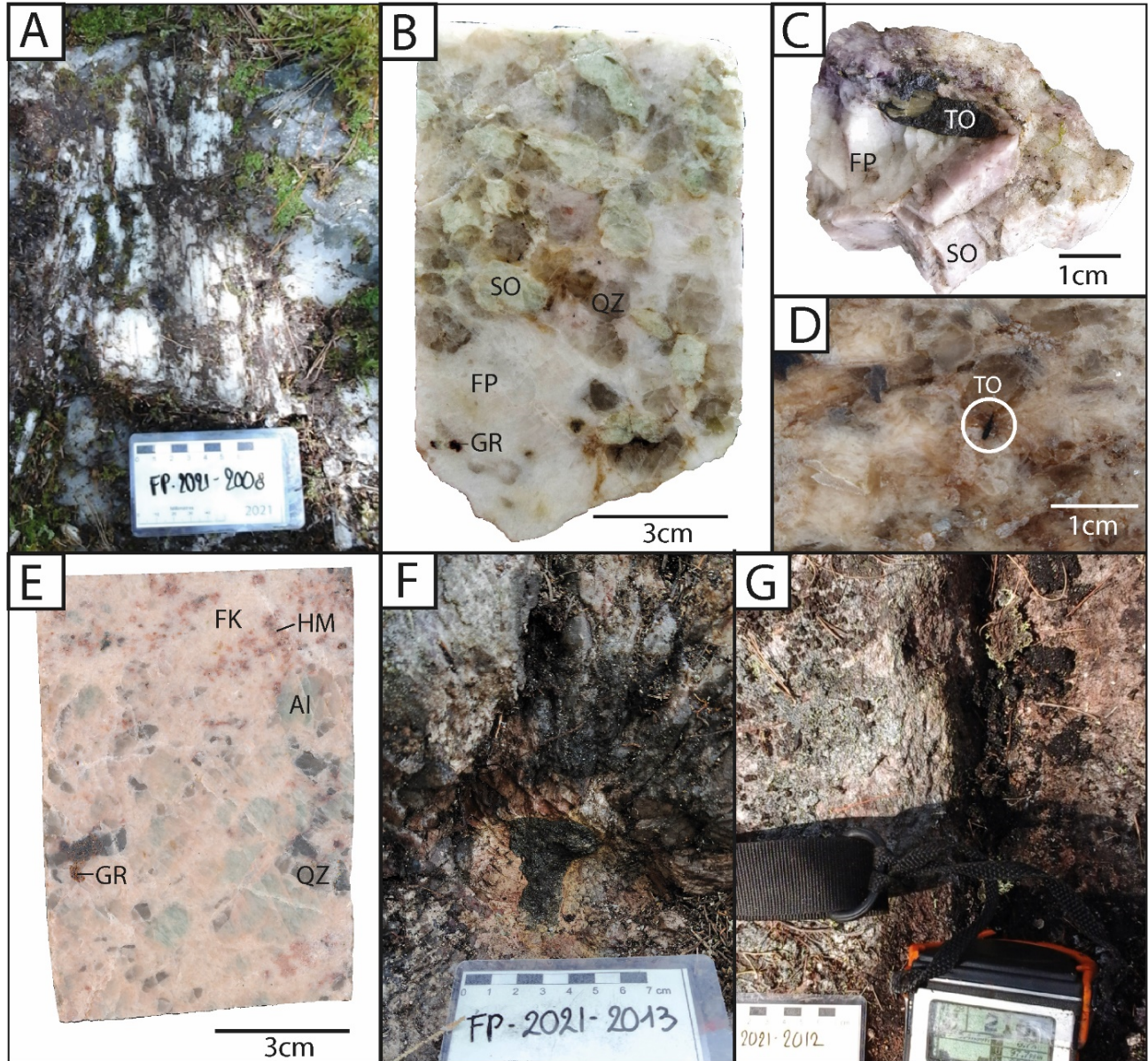


Figure 10. Photographie de dykes de pegmatites. A) Spodumène vert décimétrique à l'indice Viau. Affleurement 2021-FP-2008. B) Tranche sciée présentant des minéraux de spodumène vert pluricentimétrique de l'indice Viau-Dallaire. Affleurement 2021-FP-2002. C) Spodumène rose et colombo-tantalite centimétrique de l'indice Viau. D) Cristal de colombo-tantalite sur une tranche sciée de l'indice Viau-Dallaire. E) Tranche sciée de pegmatite à amazonite de l'affleurement 2021-FP-2016. F) Agrégat d'uraninite-pyrochlore fortement radioactif observé sur l'indice Rivard. Affleurement 2021-FP-2013. G) Diagenèse radioactive (2167 cps) affectant la monzonite sur l'indice Péninsule. Affleurement 2021-FP-2012. Abréviations: AI = amazonite, FP = feldspath, GR = grenat, HM = hematite, QZ = quartz, FK = feldspath potassique, SO = spodumène, TO = colombo-tantalite. Voir figure 8 pour la localisation des affleurements.

Mesures radiométriques

Les mesures par spectromètre indiquent un débit de dose faible globalement compris entre 60 et 160 nSv/h pour les roches du secteur avec quelques valeurs anormales supérieures à 1000 nSv/h (*figure 11A*). Les mesures sur les roches à grains fins à grossiers du BLS et du BRD montrent des valeurs similaires sauf pour la mesure sur l'indice Péninsule qui est associée à des fractures radioactives dans le BLS (affleurement 2021-FP-2012). Plusieurs autres zones anormales en eU et eTh² sont associées soit à des indices connus (affleurements 2021-FP-2006, 2012, 2013 et 2014), soit à des faciès pegmatitiques à l'intérieur du BRD (affleurements 2021-FP-2024, 2034 et 2041). Bien que les pegmatites de type LCT et Mixte aient des teneurs en K, eU et eTh ainsi que des ratios eU/eTh, eU/K et eTh/K généralement moins élevés que ceux de type NYF, le faible nombre de mesures et l'hétérogénéité des valeurs à l'intérieur d'un même dyke ne permet pas une distinction claire entre les dykes minéralisés et non minéralisés, par exemple; le ratio K/Rb le permet (*figures 11 et 12*).

Mesures de susceptibilité magnétique

Dans la plupart des échantillons, les cristaux de magnétite sont la cause principale du magnétisme de la roche. Or, étant donné que la magnétite peut atteindre une taille subcentimétrique, notamment dans les pegmatites, les échantillons ne sont donc pas nécessairement représentatifs de la susceptibilité des dykes.

Cela étant dit, on remarque que 40 échantillons sur 53 présentent une valeur de susceptibilité magnétique inférieure à 2×10^{-3} SI (*figure 13*). Plus précisément les pegmatites sont généralement très peu magnétiques et les valeurs les plus élevées sont associées aux faciès du BLS. On remarque cependant que les pegmatites minéralisées de type NYF sont légèrement plus magnétiques que les pegmatites de type LCT et Mixte. Quand on compare la susceptibilité magnétique avec les mesures de spectrométrie prises sur le terrain, on note une subtile augmentation de la susceptibilité magnétique pour les pegmatites plus radioactives (*figure 14*).

² Des valeurs supérieures à 10 fois la composition moyenne de la croûte continentale (Haynes, 2016), soit eU > 27 ppm et eTh > 96 ppm, sont considérées anormales sans pour autant être indicielles (U > 425 ppm ; Th > 440 ppm ; MERN, 2021).

Ce constat est conforme à ce qui était observé sur le terrain à ce que les agrégats de minéraux dans les poches plus radioactives dans les pegmatites étaient magnétiques.

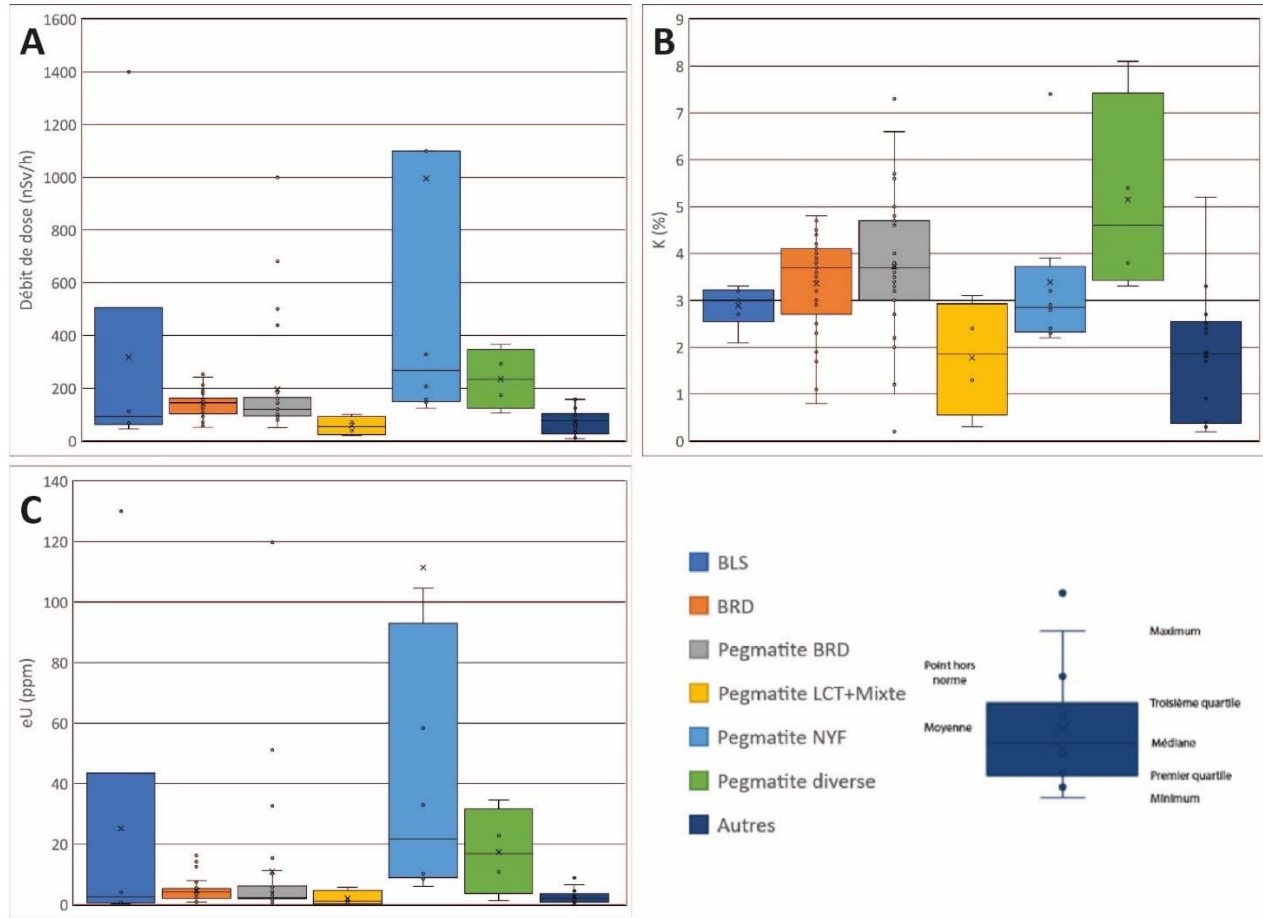


Figure 11. Graphique de boîte à moustache des valeurs de spectromètre à rayon gamma pour le débit de dose (A), le potassium (B) et l'équivalent uranium (C) pour les BLS et BRD (grains fins à grossiers), les pegmatites et autres lithologies (schiste, diabase, volcanite mafique, alaskite). Les pegmatites diverses sont des dykes à l'extérieur du BRD. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes.

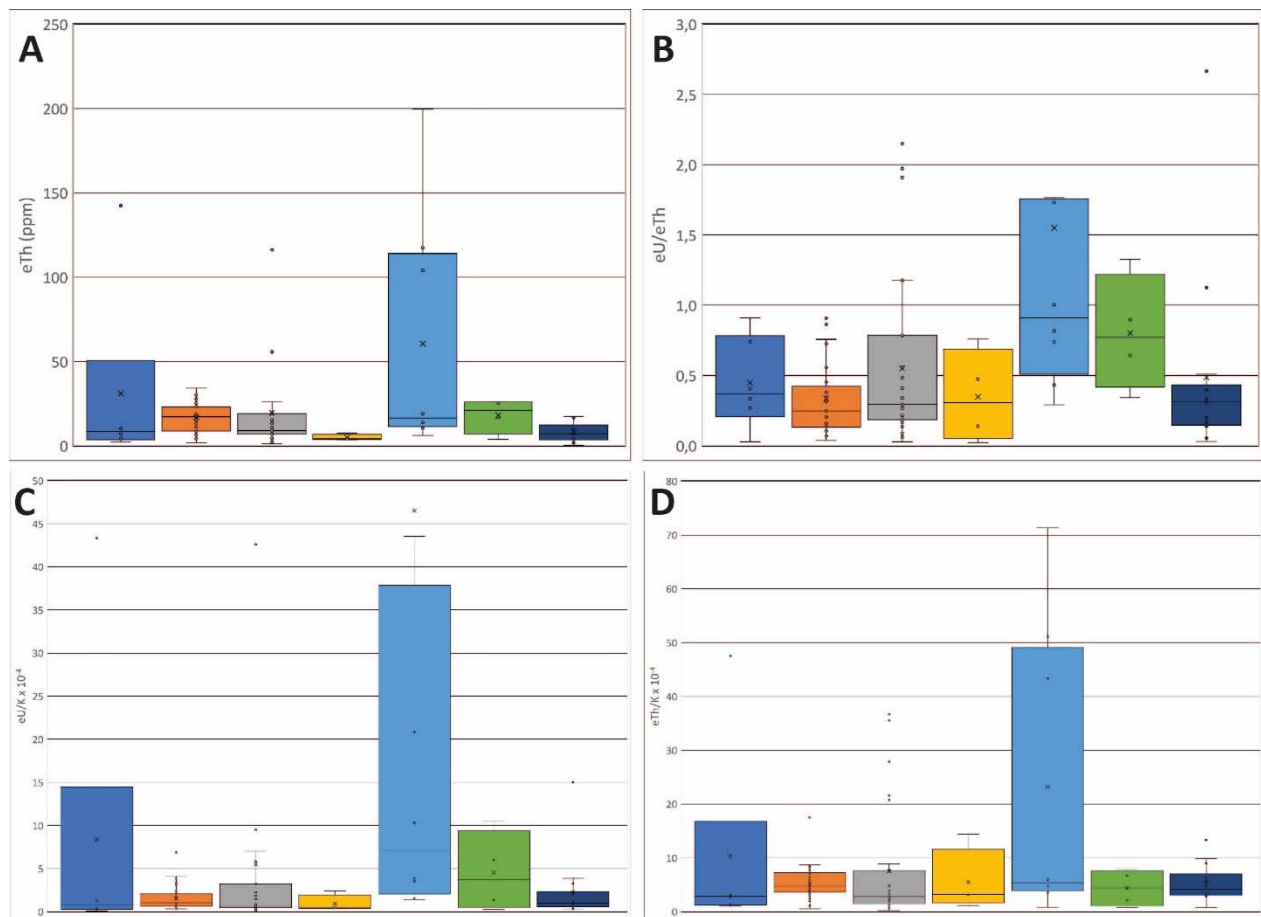


Figure 12. Graphique de boîte à moustache des valeurs de spectromètre à rayon gamma pour l'équivalent thorium (A), les ratios eU/eTh (B), eU/K (C) et eTh/K (D) pour les BLS et BRD (grains fins à grossiers), les pegmatites et autres lithologies (schiste, diabase, volcanite mafique, alaskite). Les pegmatites diverses sont des dykes à l'extérieur du BRD. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes. Légende à la figure 11.

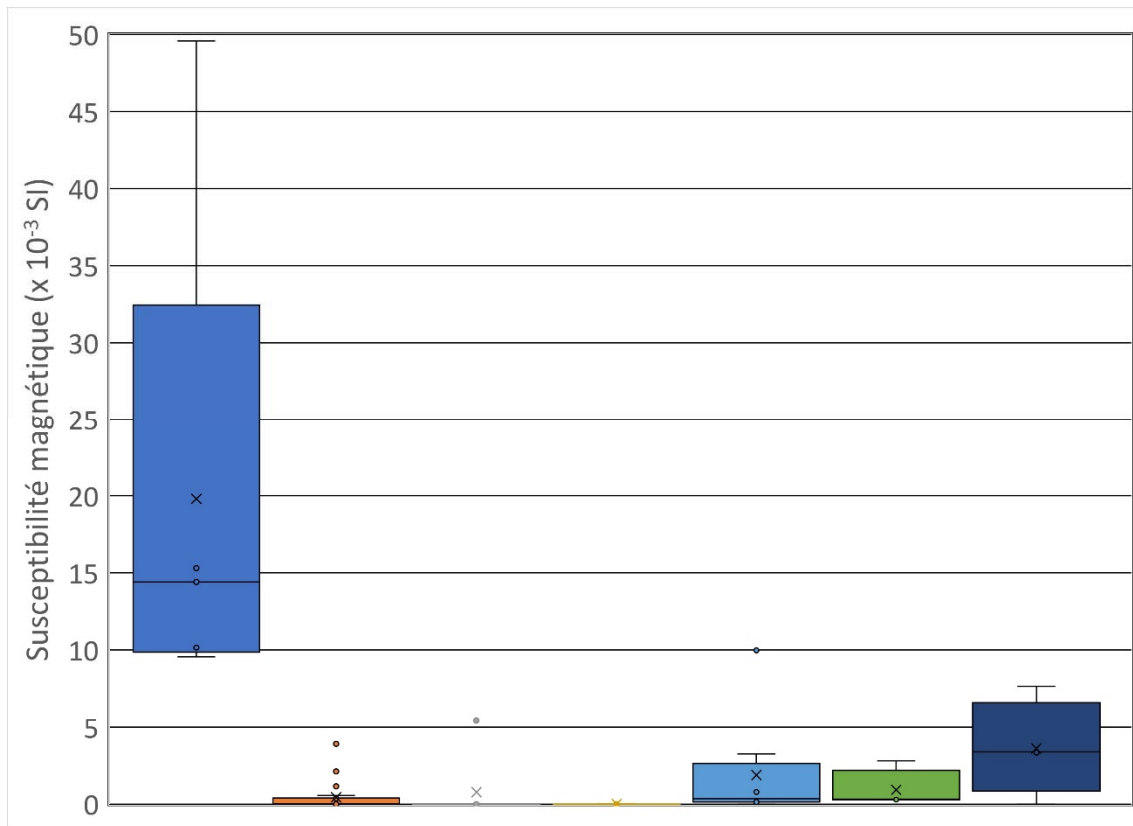


Figure 13. Graphique de boîte à moustache pour les valeurs de susceptibilité magnétique obtenues sur les échantillons collectés pour les BLS et BRD (grains fins à grossiers), les pegmatites et autres lithologies (schiste, diabase, volcanite mafique, alaskite). Les pegmatites diverses sont des dykes à l'extérieur du BRD. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes. Même légende qu'à la figure 11.

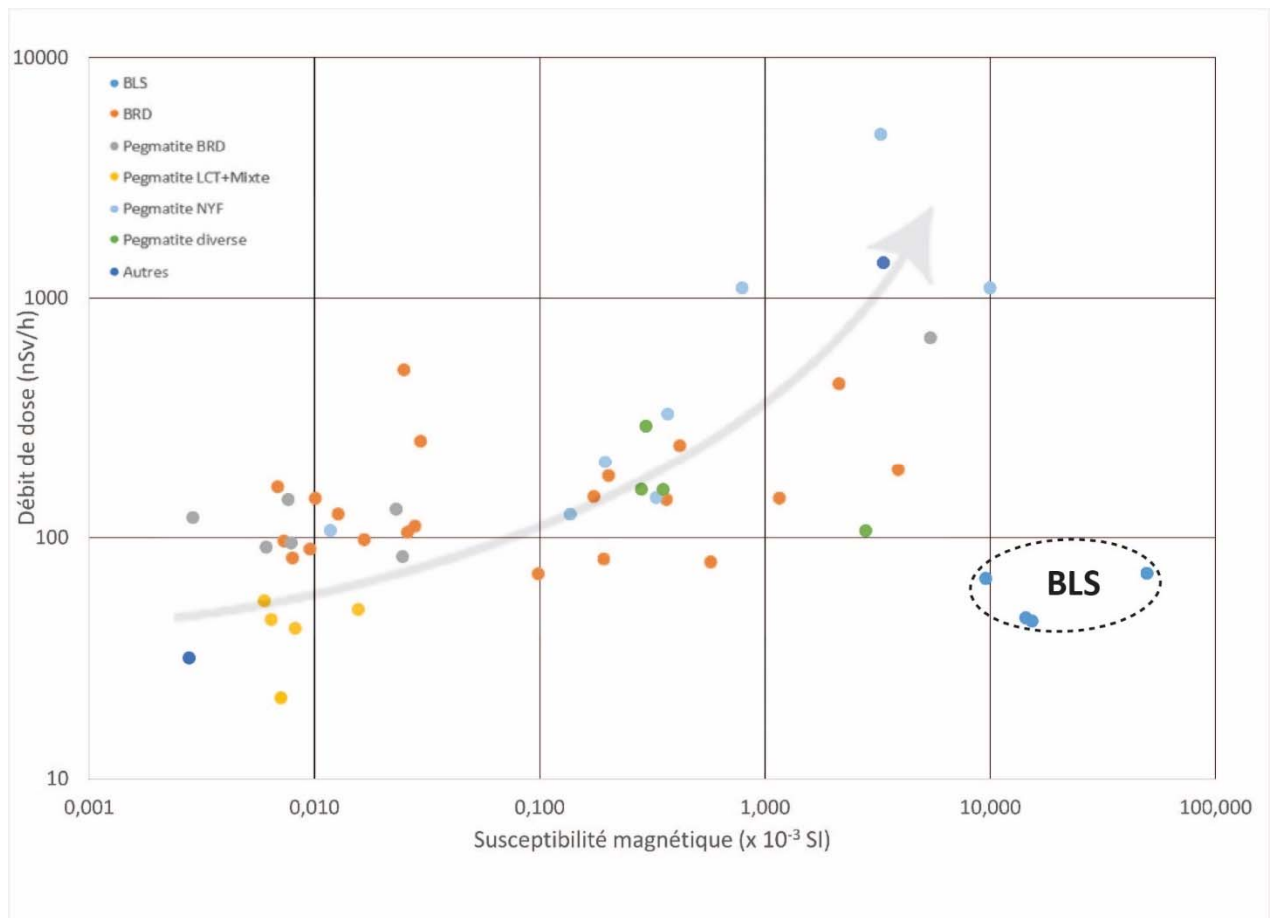


Figure 14. Graphique du débit de dose en fonction de la susceptibilité magnétique pour les BLS et BRD (grains fins à grossiers), les pegmatites et autres lithologies (schiste, diabase, volcanite mafique, alaskite). Les pegmatites diverses sont des dykes à l'extérieur du BRD. Avec les échantillons de pegmatite, on note une tendance entre l'augmentation de la radioactivité et celle de la susceptibilité magnétique.

Conclusion

L'objectif de ce projet de fin d'études était d'étudier le potentiel en Li et en Ta du secteur nord du lac Simard, situé dans la région du Témiscamingue. Les travaux de compilation et la campagne de cartographie et d'échantillonnage ont permis de déterminer que le potentiel en MCS du secteur est concentré dans la partie nord du lac Simard en bordure du Batholithe du Réservoir Decelles. En effet les relations de recoupement, les âges et la géochimie semblent indiquer que les pegmatites minéralisées sont issues de cette intrusion. Le potentiel économique du secteur semble plutôt associé aux dykes de pegmatite de type LCT. Ces dykes sont en grande majorité riches en spodumène et en moindre quantité la colombo-tantalite qui pourrait être perçue comme possiblement un sous-produit. Les dykes de type LCT comptent parmi les dykes les plus fractionnés du secteur et sont identifiables par les ratios d'éléments chimiques éprouvés, surtout le ratio K/Rb. Cependant, les mesures de spectrométrie à rayon gamma et de susceptibilité magnétique ne permettent pas une telle distinction.

Recommandations

Les recommandations pour la suite du projet sont les suivantes :

- Décrire la lithologie des échantillons collectés plus en détail grâce aux plaques de coloration pour le feldspath potassique afin de déterminer précisément le nom de la roche et les minéraux qui s'y trouvent ;
- À l'aide des nouvelles analyses, étudier en détail la répartition des éléments dans le BRD et les dykes de pegmatites afin de mieux comprendre la métallogénie et l'évolution du secteur ;
- Examiner au microscope optique et au MEB la minéralogie et la distribution élémentaire de certains éléments (Ta, Nb, Cs, U, Th, ...) qui pourraient être valorisables et/ou délétères ;
- Une nouvelle campagne d'échantillonnage devra avoir lieu à l'été 2022 pour compléter les données déjà collectées. En premier lieu, il sera pertinent d'échantillonner les indices non visités jusqu'à présent. Également, il sera intéressant d'examiner le contact ouest du BRD afin de déterminer si les dykes de type LCT sont également présents dans ce secteur.

Évaluation du potentiel en éléments de terres rares associés aux dykes de carbonatites du secteur de l'Outaouais (L. Da Rosa)

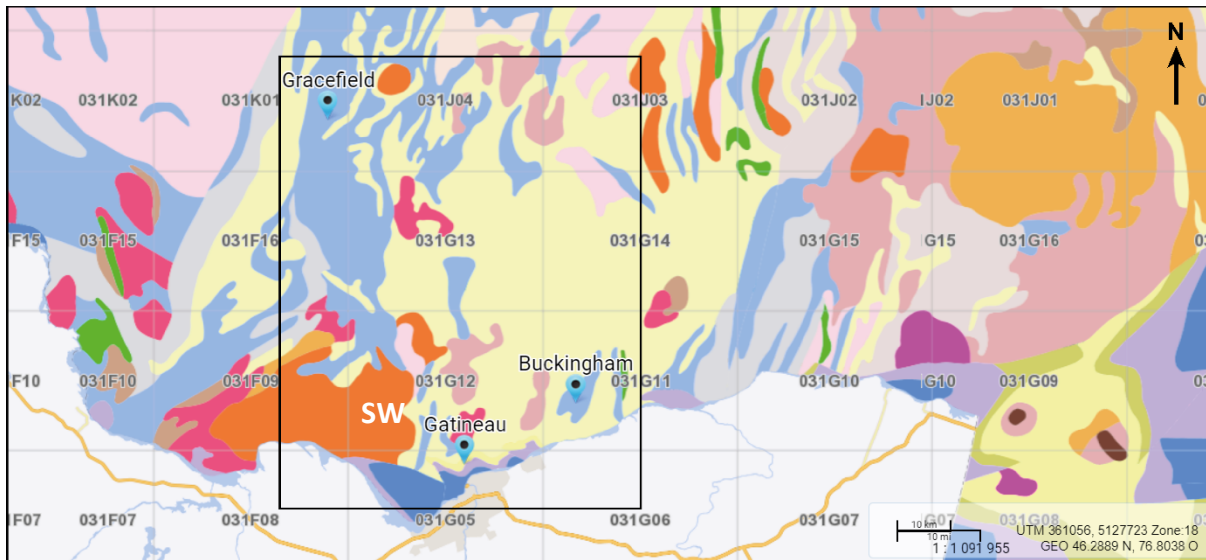
Introduction

Ce rapport présente un résumé des travaux effectués dans le cadre d'un projet de fin d'études portant sur l'évaluation du potentiel en éléments de terres rares (ÉTR) dans la région de l'Outaouais. L'objectif du projet est de faire le point sur les connaissances existantes sur le secteur et de les compiler afin de planifier une campagne d'échantillonnage et des travaux futurs.

Contexte géologique

La région de l'Outaouais se situe au contact entre la Province de Grenville et la Plate-forme du Saint-Laurent (*figures 1 et 15*). Cette dernière est restreinte à la bordure de la rivière des Outaouais où on retrouve des roches sédimentaires d'âge cambrien à ordovicien non métamorphisées. La province de Grenville est la plus récente province précambrienne, d'âge Protérozoïque supérieur, formant le Bouclier Canadien (Hocq, 1994). Elle s'étend sur 2000 km de long et 300 à 600 km de large. Elle est marquée par un degré élevé de métamorphisme régional et par la présence de roches intrusives de haute température. La Province de Grenville est principalement composée d'orthoigneiss, de paragneiss, d'amphibolites et d'intrusions felsiques à ultramafiques.

Dans le secteur à l'étude on retrouve principalement des roches métasédimentaires déposées entre 1,3 et 1,2 Ga formant le Supergroupe de Grenville. Ce sont des marbres calcitiques et dolomitiques, des gneiss, des amphibolites et des quartzites ainsi qu'un ensemble de roches calco-silicatées, comme des pyroxénites, renfermant pour certaines des gisements d'apatite et de micas (Spence, 1920). Le Supergroupe de Grenville est recoupé par un ensemble magmatique de syénite-monzonite dont celle du secteur de Gracefield et de Mont-Laurier qui ont été datées entre 1076 et 1089 Ma (Corriveau et Gorton, 1987). Le batholithe de Wakefield ferait probablement partie de cet ensemble (Béland, 1977; Madore et al., 1994) (*figure 15*) et sa mise en place a donné lieu à un métamorphisme de contact étendu formant des gisements de brucite (Hogarth, 1970).



Géologie régionale
















- | | | | |
|---|---|---|---|
|  | Syénite, monzonite, monzodiorite et autres |  | Orthogneiss et granitoïde |
|  | Paragneiss, gneiss, marbre, quartzite |  | Gabbro, norite, gabbro-norite, diorite, troctolite, pyroxénite et périclélite |
|  | Marbre, roches calco-silicatées, dolomie, schiste et quartzite |  | Basalte, andésite et amphibolite |
|  | Anorthosite, leucogabbro, leuconorite, leucotroctolite et nelsonite |  | Gneiss tonalitique et trondjhémitique |
|  | Granite, monzonite quartzifère, syénite quartzifère et pegmatite |  | Syénite, monzonite, granite et carbonatite |
|  | Dolomie, grès, calcaire et shale |  | Grès dolomitique, grès quartzitique et dolomie |
|  | Calcaire, shale, dolomie et grès |  | Roches intrusives alcalines intermédiaires à ultramafiques, brèches de diatrème et cornéennes |
| | |  | Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène |

Figure 15. Carte géologique du sud-ouest du Québec à l'échelle 1 : 1 000 000 montrant la géologie générale du secteur d'étude situé dans l'Outaouais (cadre noir). SW = Syénite de Wakefield. Tirée du SIGEOM (2021).

Durant l'orogénèse de Grenville (épisode d'Ottawa), le métamorphisme régional a atteint le faciès des granulites à 1020-1090 Ma (Rivers et al., 2012) et des intrusions magmatiques (granites pegmatitiques et aplitiques, granitoïdes et syénites) se sont mises en place. Le magmatisme mineur associé à la mise en place des dykes de carbonatites et aux fénites associées est fixé à 1026-1028 Ma et semble marquer la fin de cette orogénèse (Hogarth et van Breemen, 1996). Cet âge est similaire à celle de la carbonatite de Sullivan Island, à 80 km au NW de la région, datée à 1050 Ma (Lumbers, 1982).

Des dykes de carbonatites ont également été répertoriés à l'est d'Ottawa (au sud immédiat du

secteur à l'étude) et ont donné des âges d'environ 110 Ma (Hogarth et al., 1988). Ils pourraient donc représenter un événement tardif du magmatisme alcalin relié aux Collines montérégiennes (Brisebois et Brun, 1994).

Problématique

Ce stage sur les minéraux critiques et stratégiques (MCS) porte principalement sur les gîtes d'éléments de terres rares (ÉTR). Les complexes alcalins à carbonatites constituent de nos jours la principale source en ÉTR et en Nb (Van Gosen et al., 2017; Simandl et al., 2018; Simandl et Paradis, 2018). Le niobium est généralement exploité depuis les pyrochlores et la columbo-tantalite. Les ÉTR légers sont concentrés dans les fluides tardifs associés aux intrusions de carbonatites ou hyperalcalines. Pour les carbonatites ils se trouvent dans les zones bréchiques, les dykes radiaux et les « cones sheets » (*figure 16*) (Richardson et Birkett, 1996). Les zones enrichies en ÉTR peuvent être distales aux intrusions. Les minéraux habituellement porteurs d'ÉTR sont la monazite, la bastnaésite et la parisite (Simandl et Paradis, 2018). Les pyrochlores peuvent aussi incorporer une large gamme d'ÉTR (Atencio et al., 2010). Les fénites associées aux carbonatites sont généralement anormales en ÉTR mais aucune mine d'ÉTR n'exploite des fénites à ce jour (Elliott et al., 2018). Ces fénites sont les roches encaissantes immédiates des intrusions. Elles sont métasomatisées et enrichies en éléments alcalins. Généralement, elles sont d'étendues plus grandes que les carbonatites associées et elles sont caractérisées par la présence de feldspath alcalin, d'amphibole et de pyroxène sodique, de calcite et de biotite ainsi que de nombreux minéraux accessoires comme l'hématite, l'apatite, la titanite et d'autres minéraux incorporant du Nb et des ÉTR (monazite, bastnaésite, pyrochlore, ...) (Zharikov et al., 2007; Elliott et al., 2018). Les fénites sont formées par l'échange d'éléments chimiques entre les roches encaissantes et les fluides magmatiques hydrothermaux dérivés des intrusions de magmas carbonatés.

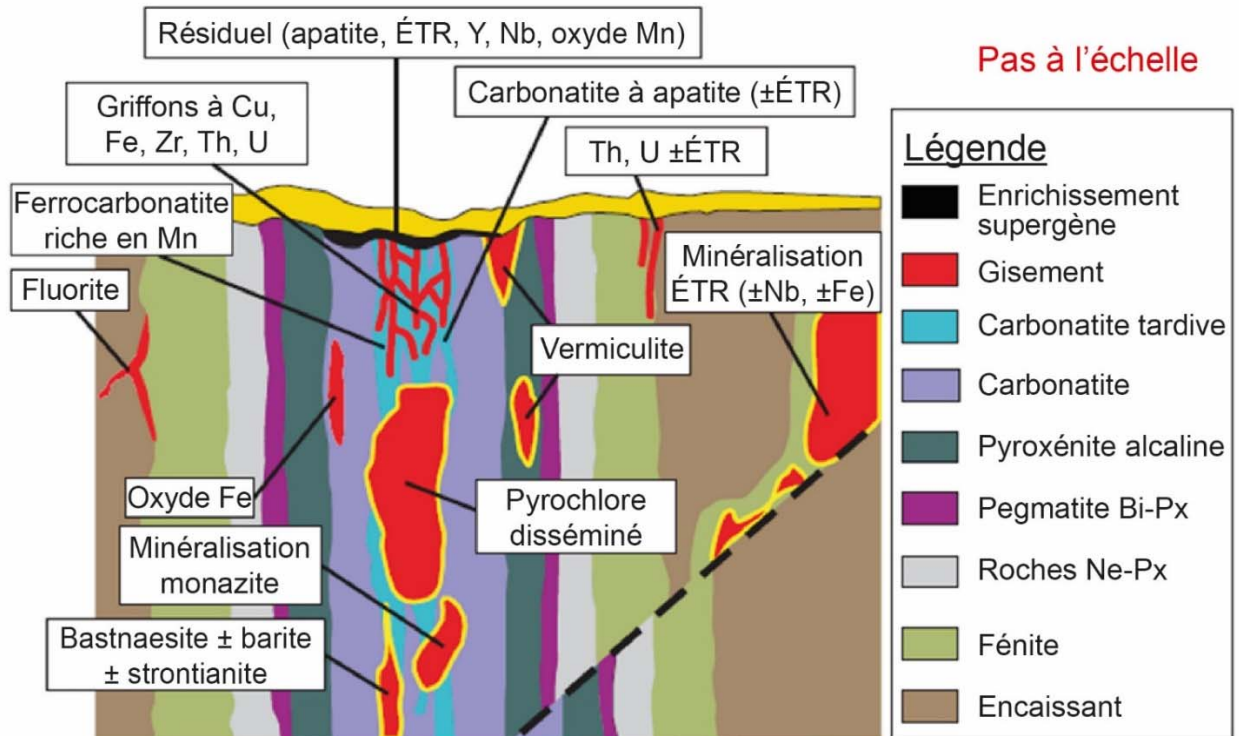


Figure 16. Illustration montrant la répartition des ressources minérales selon les lithologies et les contacts géologiques des complexes alcalins à carbonatites. Modifiée de Simandl et Paradis (2018).

L'étendue et l'intensité de la fénitisation autour des intrusions dépendent de nombreux paramètres comme la température et le pH des fluides, la composition chimique et minéralogique des roches affectées et d'autres nombreux facteurs détaillés par Zharikov et al. (2007) et Elliott et al. (2018). On observe toutefois généralement une zonation avec une fénitisation sodique distale précoce et une fénitisation potassique proximale tardive par rapport à l'intrusion de carbonatite (Elliott et al., 2018).

Plusieurs gîtes associés à des carbonatites plurikilométriques sont connues au Canada et au Québec (figure 4). Il existe deux exemples notables situés au Québec qui sont la mine Niobec du complexe de carbonatite de Saint-Honoré actuellement exploité pour son niobium et la carbonatite d'Oka, hôte de l'ancienne mine de niobium St-Lawrence Columbian (1961-76) (Sappin et Beaudoin, 2015). Ces deux intrusions représentent également une ressource importante d'ÉTR (Richardson et Birkett, 1996). Les carbonatites de Montviel et d'Ashram possèdent également des ressources en ÉTR, tandis que dans celle de Crevier les ÉTR sont définis comme des sous-produits du niobium (Sappin et Beaudoin, 2015) (figure 4). Aucun de ces gisements d'ÉTR est présentement en exploitation au Québec et aucun n'est présent en Outaouais. Par contre, il existe cinq indices d'ÉTR

en association avec des dykes de carbonatites en Outaouais (*figure 17* et *tableau 4*).

Les fénites et les dykes de carbonatites de la région ont largement été étudiés surtout par Hogarth entre 1966 et 2016 pour leur minéralogie. Plusieurs occurrences ont été signalées par Hogarth (1997) (et références ci-incluses) et les considérations pétrographiques, minéralogiques et géochronologiques de ces dykes de carbonatites sont résumées au *tableau 5*. Les carbonatites sont généralement enrichies en Ba, S, Mg, pauvres en Nb et en U avec des teneurs variables en Sr (Hogarth et al., 1985). Elles présentent de plus un enrichissement en ÉTR légères ($La/Yb = 30-260$) similaire à ceux de carbonatites d'autres régions (Samoylov et Smirnova, 1980) avec un partitionnement des ÉTR dans les carbonates (parisite, synchysite et autres non-identifiés) et les phosphates (apatite, monazite).

La plupart des dykes de carbonatites du *tableau 4* sont entourés d'un halo de fénitisation. Plus particulièrement, il existe une zone fénitisée de 22 km de long par 4 km de large s'étendant du sud-ouest au nord-est depuis Gatineau (nommée ici Fénites du ruisseau Noueux (FRN)) (Hogarth et al., 1985). Ces fénites demeurent énigmatiques car elles ne sont généralement pas retrouvées au contact direct de carbonatite et la source de cette fénitisation demeure donc inconnue (Hogarth et al., 1997). Les fénites sont habituellement caractérisées par un assemblage à Mg-arfvedsonite, aegirine, phlogopite, microcline, albite, apatite, calcite et barytine formé en remplacement de gneiss et de quartzite. Dans les FRN elles présentent une zonation à zone centrale à oxyde (hématite, magnétite, rutile), à zone intermédiaire à silicate (Mg-arfvedsonite, barytine et phlogopite) et à zone externe à acmite et phlogopite, et une couleur rouge prononcée (Hogarth, 1981).

La localisation et l'identification des dykes de carbonatites et des fénites sur le terrain sont compliquées par la localisation avant la venue des GPS, le développement domiciliaire intensif au nord immédiat de Gatineau dans les derniers 20 ans et par le manque de cartographie régionale récente dans le secteur à l'étude. Outre les cartographies ciblées par Hogarth (1970, 1981, 2008), Dupuy (1989) et Hogarth et van Breemen (1996), les cartographies à l'échelle régionale dans le secteur n'ont pas identifié ces types de roche (*figure 17*). Il faut cependant réaliser que la plupart des secteurs ont été cartographiés il y a plus de 70 ans (Wilson, 1920 ; Béland, 1977 où la cartographie a été faite en 1951) ou ont fait l'objet d'une cartographie géotechnique sommaire (Théberge, 1986) (*figure 17*).

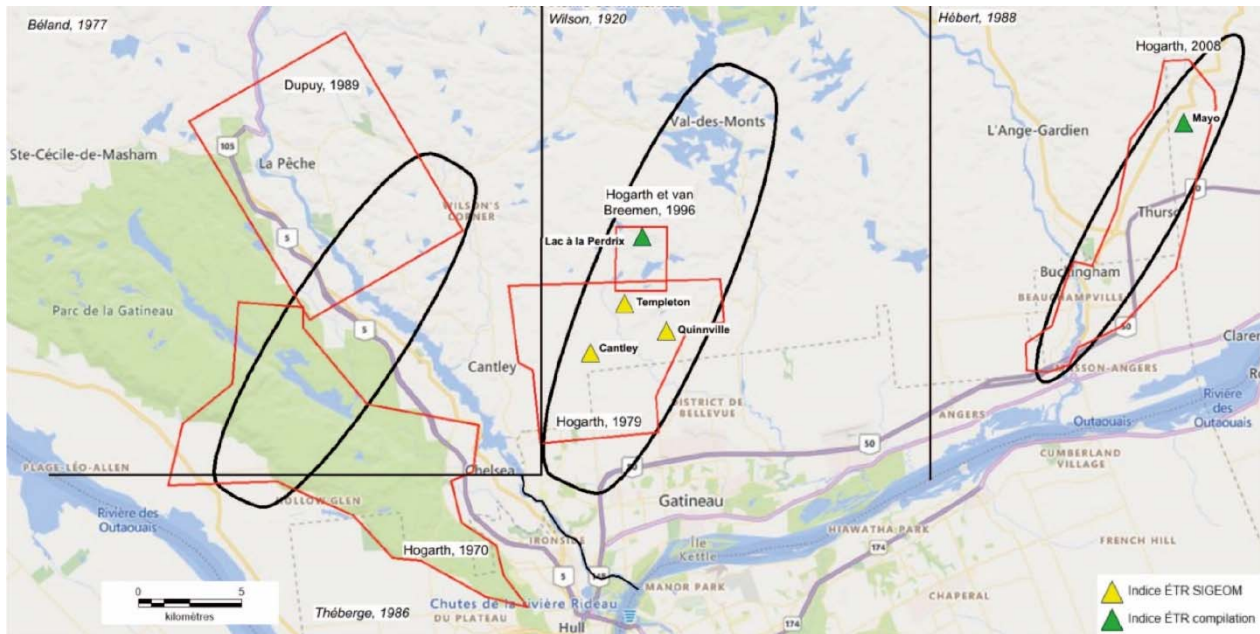


Figure 17. Localisation des cinq indices d'ÉTR associés à des carbonatites dans le secteur de l'Outaouais. Les polygones en rouge indiquent les levés géologiques ciblés qui ont identifié des carbonatites et des fénites avec la référence en gras. Les lignes noirs délimitent les dernières cartographies régionales avec la référence en italique.

Tableau 4. Localisation des indices d'ÉTR du secteur dont la valeur de la somme des ÉTR³ est supérieure à 1700 ppm, seuil anormalique défini par MERN (2021). UTM NAD 83 – zone 18.

Indice	Estant	Nordant	Somme ÉTR Carbonatites (ppm)	Somme ÉTR Fénites (ppm)
Cantley	444 057	5044774	40 600	930
Templeton	445 352	5047273	< 3 230	2 500
Quinnville	447 427	5046123	< 5 990	570
Lac à la Perdrix	445 763	5049686	< 7 300	< 12 000
Mayo	472 544	5055723	2950	?

³ Somme ÉTR = La + Ce + Nd + Gd + Er + Yb

Tableau 5. Compilation des données minéralogiques, géochronologiques et géochimiques des carbonatites connues dans le secteur de l'Outaouais.

Localité	Forme	Minéralogie	Âge	Somme ÉTR (ppm)	Nb (ppm)	Références
Autoroute 5	Dyke < 1 m d'épaisseur	Calcite, phlogopite, apatite, diopside, pargasite, titanite, pyrochlore	?	< 322	?	Sinaei-Esfahani (2013)
Buckingham - Mayo	Lentilles et niveaux irréguliers	Calcite, quartz, phlogopite, titanite, barite, fluoroapatite, monazite, synchysite, hématite	573 ± 32 Ma (K-Ar sur fenite)	< 2950	?	Lafleur et Hogarth (1981); Hogarth (1997, 2008)
Gracefield	Deux dykes de quelques décimètres d'épaisseur	Calcite, apatite, clinopyroxène et feldspath potassique	?	La = 464 ppm; Yb = 11 ppm	8	Corriveau et Gorton, 1987
Cantley	Dykes fins	Calcite, barytine, parsite, synchysite et fluorapatite	862 ± 31 Ma et 980 ± 52 Ma (K/Ar sur fenite)	< 40600	?	Hogarth (1981), Hogarth et al. (1985)
Lac à la Perdrix	Dykes NNE concordants (< 270 m de long et < 15 m de large)	Calcite, aégirine, Mg-arfvedsonite, phlogopite, barite, allanite et celestine	1026±2 Ma (U-Pb sur fenite)	< 7300	< 10	Hogarth et van Breemen (1996)
Lac McGregor	Dyke < 25 cm d'épaisseur	Calcite, aegirine, Mg-aerfvedsonite, barite, monazite, rutile, hématite	?	< 459	?	Hogarth et al. (1985)
Parc Gatineau	Corps allongés (jusqu'à 250 m x 100 m) à texture porphyrique	Calcite, dolomite, phlogopite, amphibole, fluorapatite, magnétite, pyroxène, barytine, uranopyrochlore, feldspath, zircon, rutile et quartz	1028 ± 24 Ma (Sm/Nd sur carbonatite); 910 ± 10 Ma et 930 ± 10 Ma (K-Ar sur fenite)	< 240	100 - 215	Hogarth (1997; 2016)
Perkins	Dyke moins de 50 cm d'épaisseur	Calcite, dolomite, phlogopite, fluorapatite, hématite, barytine, allanite, amphibole, rutile	?	?	?	Hogarth et al. (1987), Hogarth (1997)
Quinnville	Sill d'au moins 75 m d'épaisseur exposé sur 470 m	Dolomite, barytine, calcite, chalcédoine, fluorapatite, chlorite, fluorite, microcline, chalcopryrite, bornite et chalcocite	> 886 ± 25 Ma (K/Ar sur dyke recoupant fenite)	< 5990	?	Hogarth (1981, 1997)
Templeton	Corps lenticulaire de 150 m de long à xénolithes fénitisés	Calcite, phlogopite, barytine en intercroissances avec de la célestite, fluorapatite	?	< 3230	10	Hogarth (1981, 1997); Hogarth et al. (1985)
Wakefield	Veines bréchique (5 m d'épaisseur)	Matrice carbonatée et d'apatite rouge, Na-pyroxène et fragments de roche encaissante	?	?	?	Dupuy (1989)

Résultats

Compilation

La compilation des données géologiques du secteur a permis de mettre en évidence la présence de 5 indices d'ÉTR. Ces indices sont répertoriés dans la *figure 17* et le *tableau 4*, et proviennent du SIGEOM (3) et de la compilation des travaux de Hogarth et van Breemen (1996) et Hogarth (2008) (2).

La base de données contient la géochimie de seulement 38 échantillons de carbonatites (24) et de fénites (14) réalisés dans le cadre des travaux Hogarth et al. (1985), Hogarth et Rushforth (1986), Hogarth et van Breemen (1996), Hogarth (1997), Hogarth (2008), Sinaei-Esfahani (2013) et Hogarth (2016). De plus, ces analyses ne sont que partielles et la concentration de plusieurs éléments n'a pas été publiée. L'évaluation du potentiel en ÉTR des carbonatites ciblées dans cette étude repose principalement sur ces analyses. L'exploration minière dans le secteur est surtout concentrée sur les gisements de graphite depuis plusieurs années et donc aucune donnée n'est disponible dans les travaux statutaires.

La distribution de la somme des ÉTR pour les carbonatites et les fénites est illustrée à la *figure 18* et suggère que les valeurs les plus élevées se retrouvent au nord de Gatineau et sont spatialement associées aux FRN. La campagne d'échantillonnage et les analyses chimiques qui seront réalisées permettront une meilleure caractérisation chimique et minéralogique des dykes et des fénites (*figure 19*).

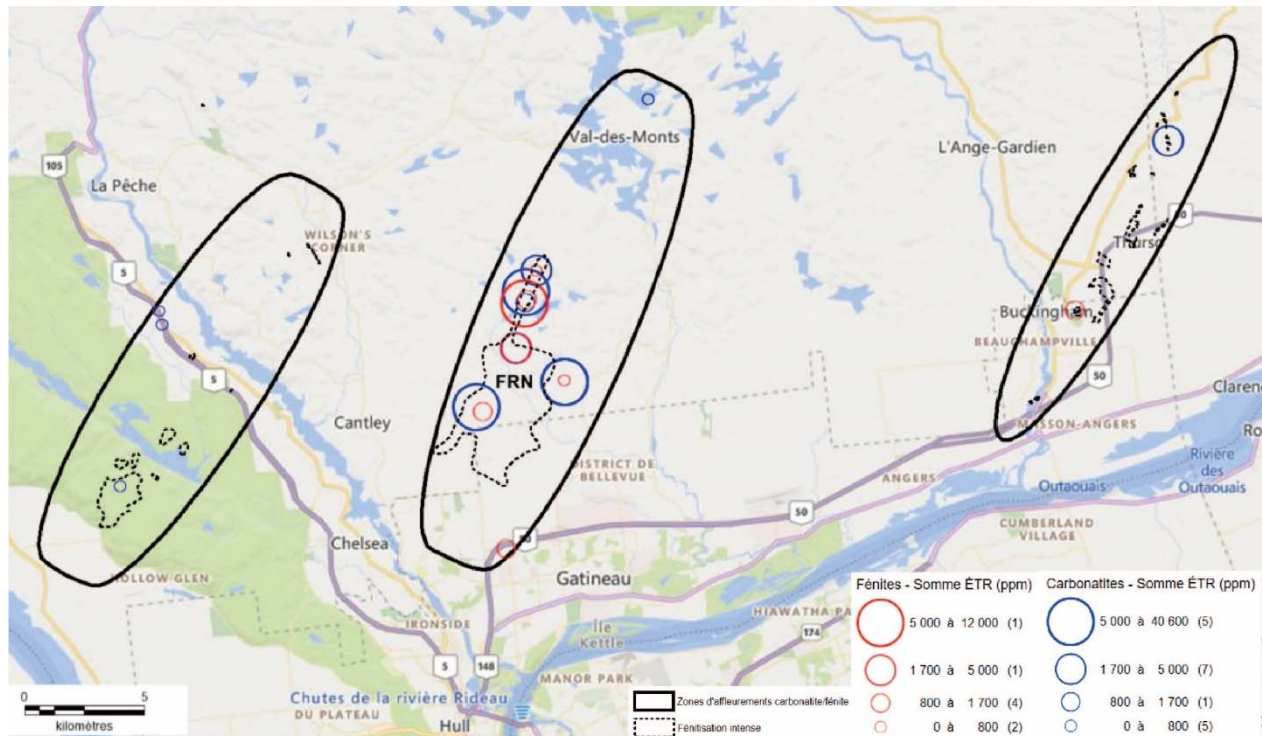


Figure 18. Distribution des carbonatites et des zones fénitisées dans le secteur de l'Outaouais d'après les cartographies énumérées à la figure 17. Les valeurs des sommes des ÉTR proviennent de Hogarth et al. (1985), Hogarth et Rushforth (1986), Hogarth et van Breemen (1996), Hogarth (1997), Hogarth (2008) et Sinaei-Esfahani (2013). FRN – Fénites du ruisseau Nouveaux.

Campagne de cartographie et d'échantillonnage

Un total de vingt-huit (28) affleurements ont été cartographiés et échantillonnés durant la campagne de terrain. Dix d'entre eux sont des dykes de carbonatites et se répartissent entre le parc de la Gatineau, le nord de Gatineau et Buckingham (*figure 19A*). Dans le secteur au nord de Gatineau huit fénites et un dyke de syénite ont également été échantillonnés. À cela s'ajoute la syénite à népheline de Cawood et deux occurrences de veines calcite-phlogopite-apatite dans la partie nord près de Gracefield qui ne seront pas discutés dans les prochaines sections. (*figure 19B*).

Quelques-uns des affleurements ciblés durant la campagne de terrain n'ont pas pu être examinés. Plus spécifiquement les dykes de carbonatites de Gracefield localisés avec des coordonnées par Corriveau et Gorton (1987) n'ont pu être retrouvés. Un des dykes de carbonatites de Wakefield, localisés sur la carte de Dupuy (1989), n'a pu également être localisé, tandis que les autres n'ont

pas été visités faute de temps. Seulement un des nombreux dykes de carbonatites du lac à la Perdrix décrits par Hogarth et van Breemen (1996) était accessible, les autres étaient situés sur des terrains privés, tout comme le potentiel dyke de carbonatite décrit à la mine Haycock par Charbonneau et Hogarth (1988).



Figure 19. Carte de localisation des 28 affleurements visités et décrits par une géofiche 2021-LD-XXXX dans la partie sud (A) et la partie nord (B) du secteur de l'Outaouais.

Carbonatites

Les carbonatites examinées affleurent en zone forestière, en milieu urbain ou en bordure de route/autoroute. En forêt elles forment généralement des reliefs couverts de mousse. En général elles ne sont pas ou peu altérées, ni déformées. Les carbonatites se présentent sous forme de dykes montrant une fénitisation de plusieurs mètres dans l'encaissant immédiat. Ces dykes sont orientés NW-SE à NE-SW de façon générale (6 mesures) avec un pendage variant de subvertical à subhorizontal. Ils sont d'épaisseur généralement de moins de 5 mètres bien qu'ils puissent parfois se restreindre à des largeurs décimétriques ou atteindre plus de 10 mètres d'épaisseur (p.ex. : affleurement 2021-LD-1004). Les carbonatites sont le plus souvent de couleur blanchâtre à beige rosé (*figure 20A*) excepté pour de rares exemples de couleur rouge brique (*figure 20B*) ou orange-rose (*figure 20C*).

Les dykes de carbonatites se présentent sous deux formes d'intrusion. Ils présentent souvent des contacts nets avec les roches encaissantes plus au moins fénitisées comme aux *figures 20A* et *20C*. Ils peuvent aussi évoluer graduellement vers des brèches d'intrusion. Dans certains cas, les brèches sont recoupées par des dykes de carbonatites et dans d'autres, aucune carbonatite n'est présente. Ces brèches montrent généralement un contact graduel avec l'encaissant fénitisé. Le montant de calcite dans la matrice de ces brèches peut être très variable, de traces (presque juste de la phlogopite) à plus de 50% (*figure 20D*).

Les dykes sont de texture massive variant de grains moyens (1 à 5 mm) à grains grossiers (5 mm à 3 cm). À seulement un endroit (affleurement 2021-LD-1006) un dyke montrant un alignement de cristaux millimétriques d'amphibole répartis au sein d'un assemblage à calcite ± feldspath a été observé.

L'assemblage minéral quasi-systématique des dykes de carbonatites se compose de carbonates, de feldspath, d'amphibole et de phlogopite (*tableau 5*). Les carbonates constituent entre 60 et 80% de la proportion minérale (évaluée à l'œil nu). Il s'agit surtout de calcite avec ± dolomite parfois distinguable par leur couleur respectivement blanchâtre à rosée et beige à brunâtre et leur degré de réactivité à l'HCl. La phlogopite (1-5%) forme des feuilletts millimétriques bruns. Elle forme des amas au sein de la roche ou est concentrée aux épontes des dykes et autour d'enclaves de roche encaissante dans les brèches (*figure 20D*). L'amphibole est une amphibole sodique, soit de la magnésio-arfvedsonite et/ou de la richtérite (Hogarth, 1997). Il s'agit de baguettes

plurimillimétriques de couleur noire bleutée à verdâtre constituant entre 2 et 15% de la roche. De façon moins récurrente se trouvent des sulfures, principalement de la pyrite et de la chalcopryrite, disséminées dans la roche ou concentrées aux épontes des dykes, ainsi que des minéraux noirs millimétriques et arrondis pouvant être des oxydes ou bien des pyrochlores (Hogarth, 1997).

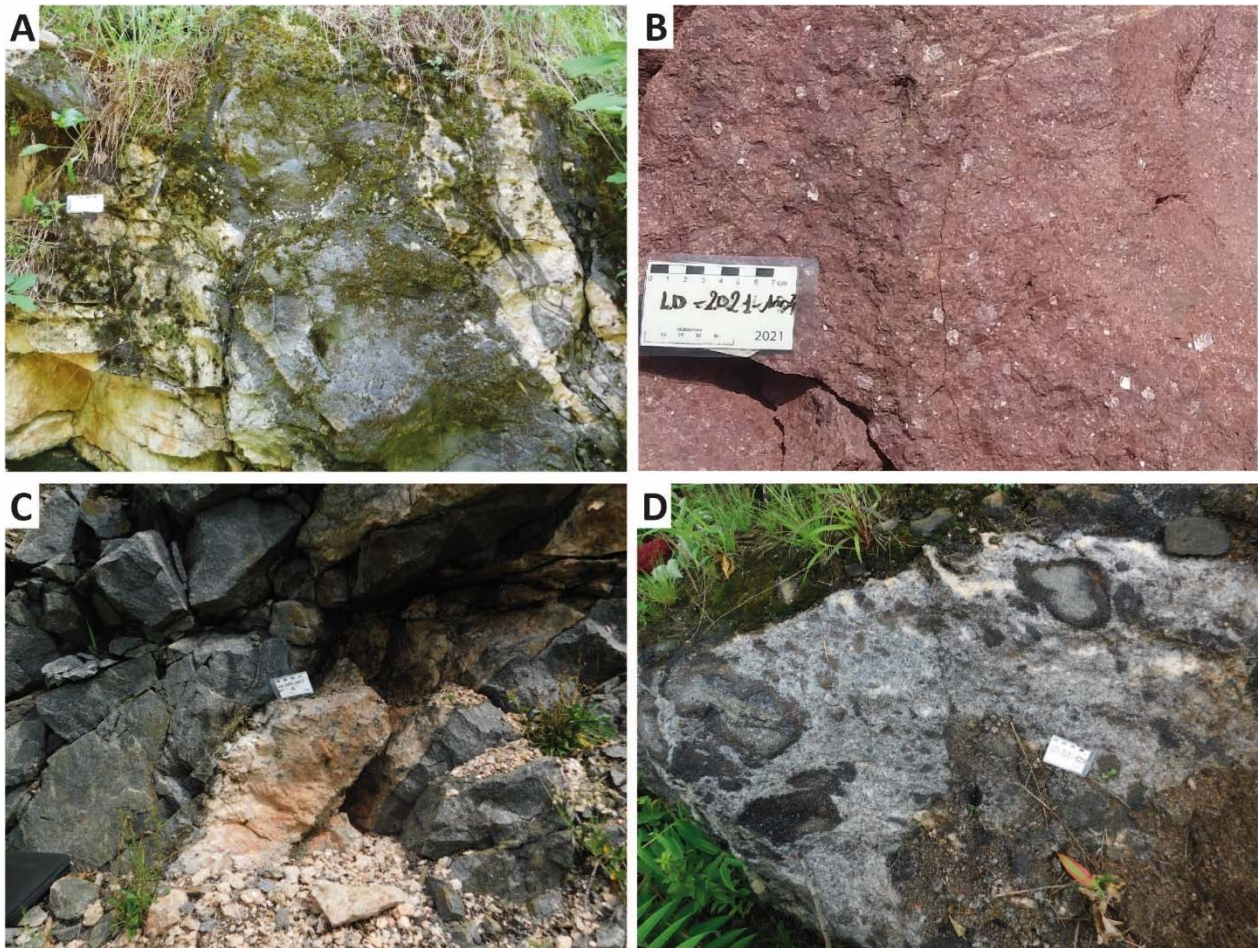


Figure 20. Photographies de carbonatites. A) Dykes de carbonatite de couleur typique blanc-beige recoupant une alaskite fénitisée. Affleurement 2021-LD-1010. B) Rare carbonatite de couleur rouge brique variant de grains moyens à grains grossiers; la couleur est due à des inclusions d'hématite dans la calcite. Affleurement 2021-LD-1004. C) Dyke de carbonatite orange-rose en bordure de l'autoroute 5. Ce dyke a rapporté des valeurs de près de 100 ppm eU sur le spectromètre à rayon gamma. Affleurement 2021-LD-1009. D) Brèche à matrice riche en calcite-phlogopite montrant des fragments de gneiss fortement altérés en phlogopite dans leurs bordures. Cette brèche est recoupée par un dyke de carbonatite beige et un autre rose. Affleurement 2021-LD-1007.

La barytine est présente dans plusieurs dykes examinés sur la base des observations et des analyses d'Hogarth (1997), et de la densité apparente importante de la roche. Bien que pas observés à l'œil nu, les minéraux contenant les ÉTR seraient l'apatite, la monazite, la parisite et l'allanite (Hogarth et al., 1985).

Des échantillons des dykes de carbonatites du parc de la Gatineau (affleurement 2021-LD-1010) et du lac à la Perdrix (affleurement 2021-LD-1006) ont été prélevés pour la réalisation d'une datation U-Pb par Don Davis à l'Université de Toronto.

Fénites

Plusieurs affleurements de fénite ont été examinés et une attention particulière a été portée aux FRN (*figure 18*). Cette zone fait partie d'un alignement NE-SW d'affleurements éparpillés de carbonatites et de fénites décrites par Hogarth et al., (1985) qui peut être suivi jusqu'à Val-des-Monts. Un tel alignement peut aussi être observé avec les affleurements dispersés du secteur parc de la Gatineau – Wilson's Corner ainsi que dans le secteur de Buckingham (Hogarth, 2008) (*figure 18*). Dans les trois cas, ces alignements sont subparallèles au grain tectonique régional et ils font plus de 15 km de long et ont jusqu'à 6 km de large. Cependant, ces alignements sont possiblement le fruit d'une cartographie ciblée et d'autres affleurements sont probablement présents ailleurs.

La plupart des affleurements des FRN se situent en zone forestière adjacente à des habitations en bordure de routes et sont de faibles dimensions. Ce sont des roches à texture massive et à grains fins (0,1 à 1mm) voire à grains moyens (1 à 5mm) fortement altérées. Les minéraux d'altération remplacent systématiquement les minéraux métamorphiques. Les FRN sont généralement de couleur orange à rougeâtre, due à la présence importante de feldspath potassique ± hématite et tachetées de vert ou de noir par l'agglomération de cristaux d'amphibole, de pyroxène et de phlogopite selon le type de fénite (Hogarth et al., 1981) (*figure 21*). Ailleurs l'hématisation est beaucoup moins marquée et les fénites sont associées à une altération en phlogopite et en amphibole sodique. Les fénites contiennent systématiquement du quartz (jusqu'à 35%) et de la calcite (jusqu'à 10%). Les minéraux à ÉTR seraient l'apatite, l'allanite et la monazite (Hogarth, 1997).

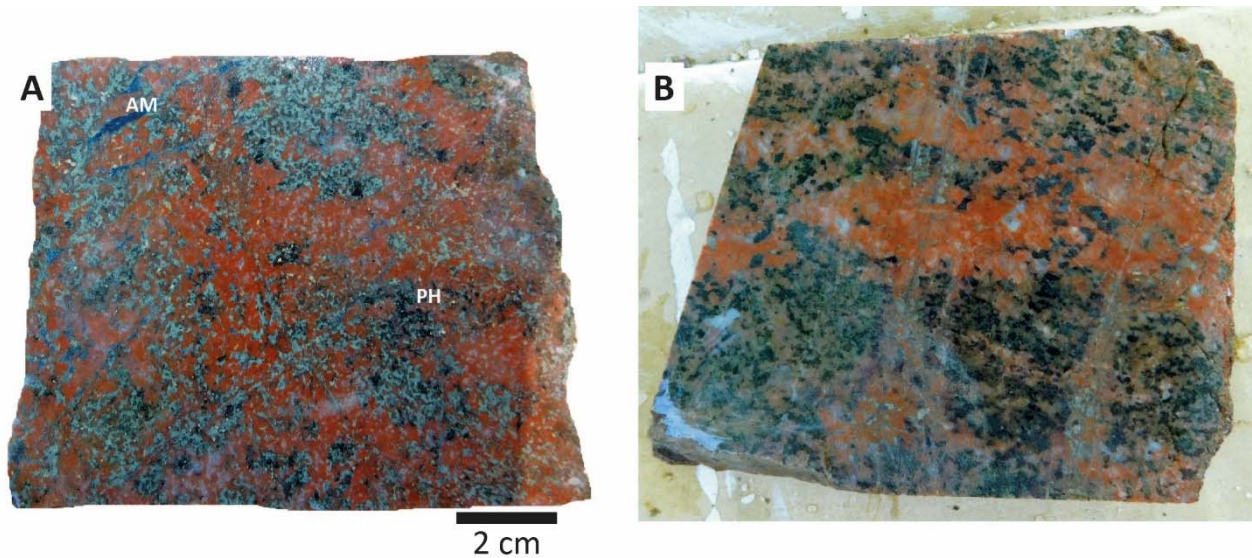


Figure 21. Photographies des fénites. A) Section coupée d'une fénite à amphibole alcaline bleuté (AM) et phlogopite noire (PH) dans une matrice de feldspath potassique (rouge) – quartz (gris) – aegirine (vert). Affleurement 2021-LD-1018. B) Section coupée d'une fénite à amphibole noire dans une matrice de feldspath potassique (rouge) – quartz (gris). Affleurement 2021-LD-1024.

La croissance des minéraux montre une chronologie systématique dans le secteur des FRN et elle peut être divisée en quatre étapes selon les observations de Hogarth et van Breemen (1996) :

- 1) Oxydation du fer et bréchification de l'encaissant;
- 2) Remplacement et cristallisation des amphiboles et des pyroxènes sodiques (surtout de la magnésio-arfvedsonite et de l'aégirine respectivement) vers l'extérieur des fractures des brèches;
- 3) Croissance de microcline recristallisée, apparition d'albite, injection de calcite;
- 4) Remplacement et croissance continue des amphiboles/pyroxènes jusqu'à oblitération de la foliation dans l'encaissant.

Mesures radiométriques

Les mesures par spectromètre indiquent un débit de dose faible globalement compris entre 30 et 80 nSv/h pour les roches du secteur avec quelques valeurs anormales supérieures à 500 nSv/h (*figure 22*). Bien que les carbonatites ont généralement des concentrations plus élevées en uranium et en thorium et plus faibles en potassium que les fénites, le faible nombre de mesures et l'hétérogénéité des valeurs et des ratios à l'intérieur d'un même groupe ne permettent pas une distinction claire entre ceux-ci (*figures 22 et 23*). Les travaux de Charbonneau et Hogarth (1988) avaient noté qu'une partie des FRN montraient des anomalies en potassium sur les levés radiométriques aérien et sur le terrain ($> 12\% K$) (*figure 24A*). Les plus grandes anomalies en potassium sur le levé aérien (est et nord-est immédiat de l'affleurement 2021-LD-1004) sont possiblement associées à des fénites potassiques non cartographiées jusqu'à présent (Charbonneau et Hogarth, 1988). Elles sont discernables des anomalies de potassium associées aux syénites par un plus faible ratio eTh/K . Les levés aériens semblent corroborer l'orientation NE-SW des couloirs fénitisés mais l'espacement des lignes de vol de 5 km n'est pas optimal pour localiser des zones éparpillées.

Mesures de susceptibilité magnétique

Les mesures de susceptibilité magnétique indiquent que la majorité des échantillons de carbonatites et de fénites sont très peu magnétiques avec 18 échantillons sur 22 présentant une valeur de susceptibilité magnétique inférieure à $0,6 \times 10^{-3}$ SI (*figure 25*). Certains échantillons récoltés dans les hauts magnétiques du levé aérien couvrant les FRN montrent des susceptibilités magnétiques élevées (affleurements 2021-LD-1006, 1024 et 1025), tandis que d'autres montrent des valeurs faibles (p. ex. : affleurements 2021-LD-1005, 1023 et 1028) (*figure 24B*). Les travaux de Charbonneau et Hogarth (1988) suggèrent une fénitisation plutôt sodique (Mg-arfvedsonite et aegirine) avec magnétite disséminée dans la partie ouest des FRN et plus potassique (microcline) et fortement hématisée dans la partie est.

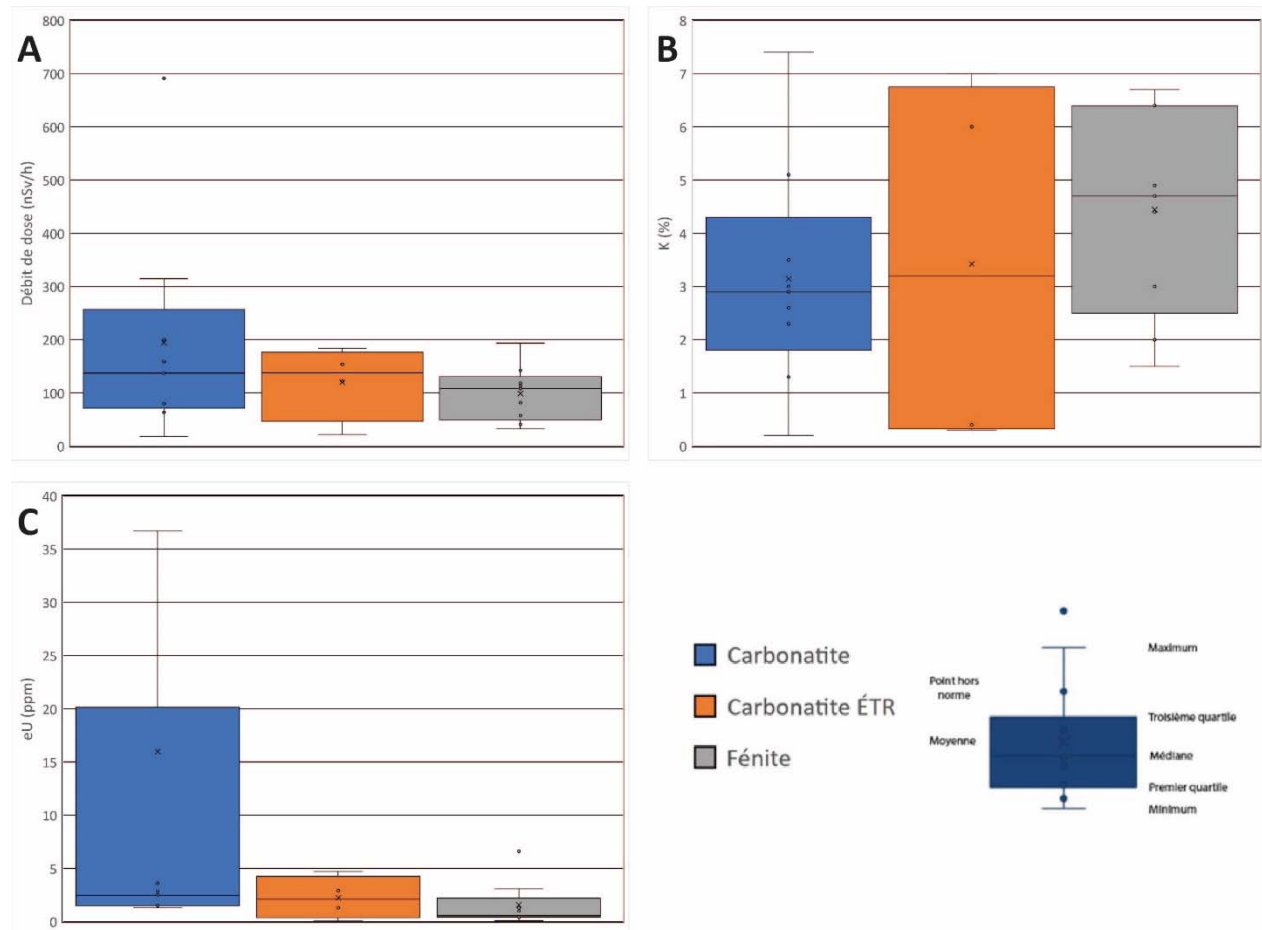


Figure 22. Graphique de boîte à moustache pour le débit de dose (A), le potassium (B), l'équivalent uranium (C) et l'équivalent thorium (D) des valeurs de spectromètre à rayon gamma pour les carbonatites non minéralisées et minéralisées en ÉTR et les fénites. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes.

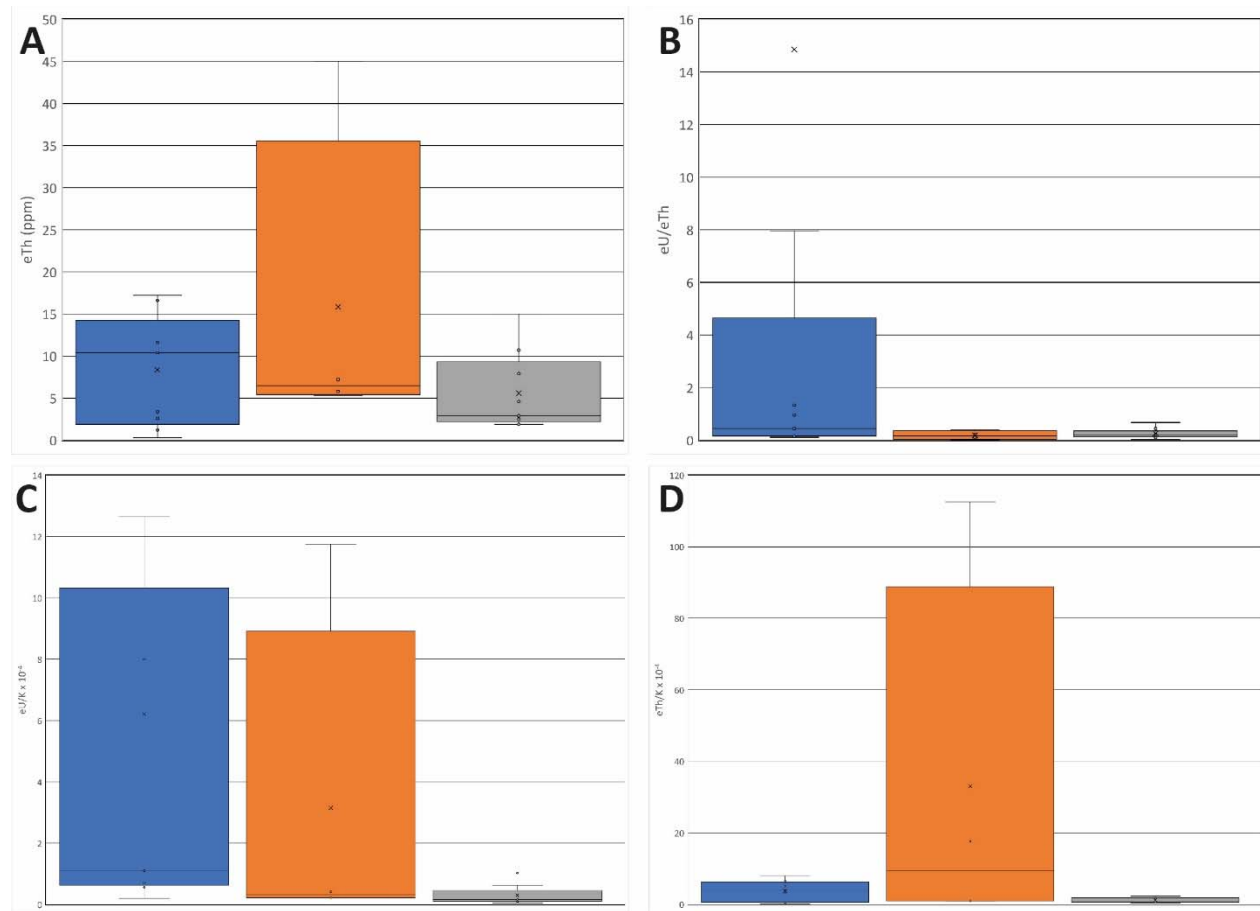


Figure 23. Graphique de boîte à moustache pour les ratios eU/eTh (A), eU/K (B) et eTh/K (C) des valeurs de spectromètre à rayon gamma pour les carbonatites non minéralisées et minéralisées en ÉTR et les fénites. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes. Légende à la figure 22.

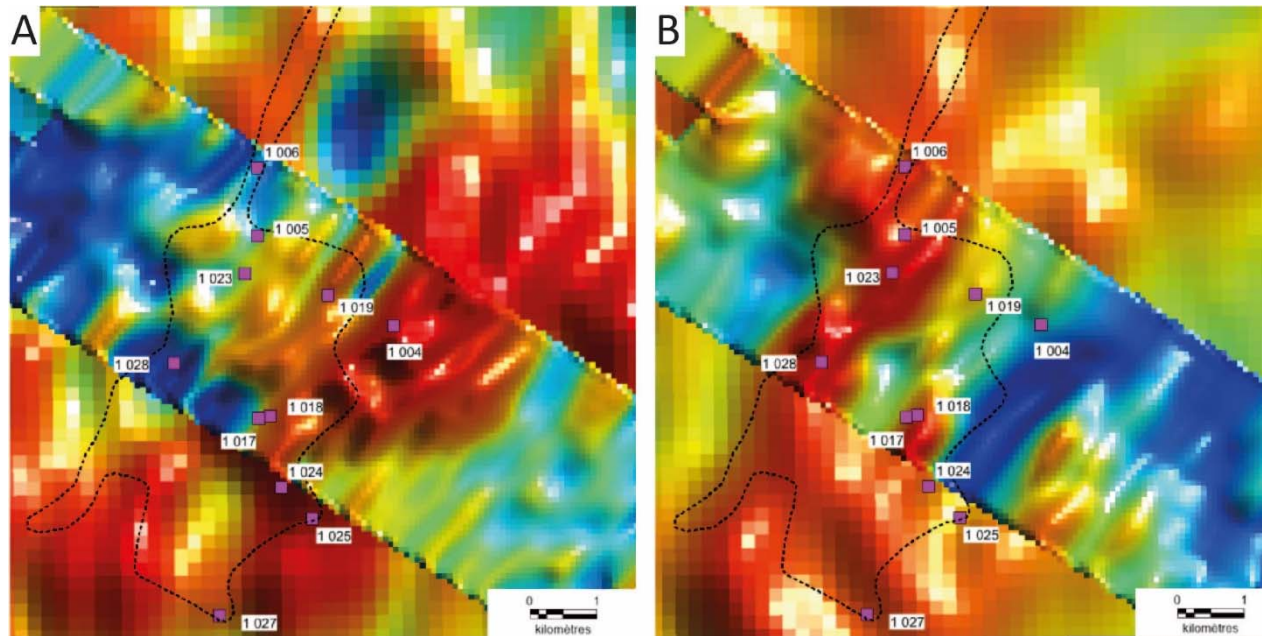


Figure 24. Levés géophysiques aériens couvrant les FRN. Spectrométrie à rayon gamma (potassium) (A) et magnétométrie (champ total) (B). Le levé régional (1994) a été effectué avec un espacement des lignes de vol à 1000 m (pixel = 200 m), tandis que le levé détaillé (1983) a des lignes de vol à 400 m (pixel = 80 m). Valeurs plus élevées en rouge ($\sim 3,8\%$ K, ~ 58300 nT); plus faibles en bleu. FRN définies en pointillées. Données de NRCan (2021).

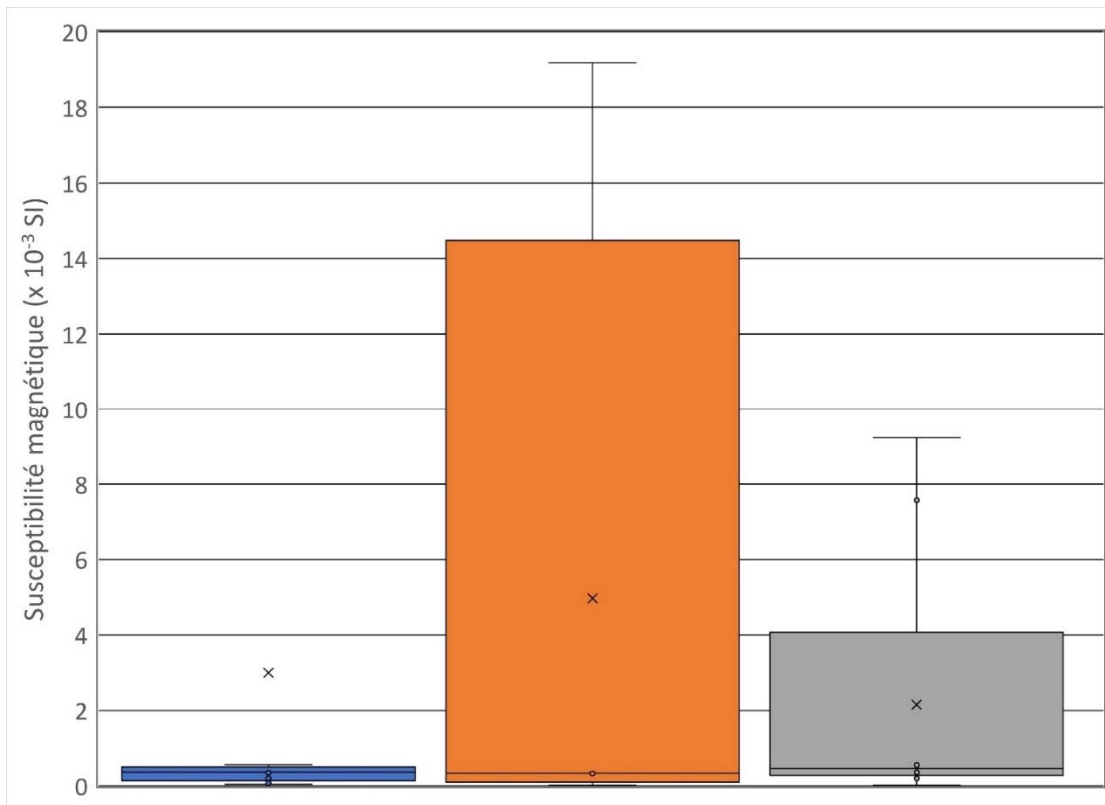


Figure 25. Graphique de boîte à moustache pour les valeurs de susceptibilité magnétique obtenues sur les échantillons de carbonatites et de fénites. Certains points hors normes ont été omis afin de mieux illustrer les variations entre les groupes. Légende à la figure 22.

Conclusion

L'objectif de ce projet de fin d'études était d'étudier le potentiel en ÉTR des dykes de carbonatites de la région de l'Outaouais. Les travaux de compilation et la campagne d'échantillonnage ont permis de déterminer que les affleurements de carbonatites et de fénites définissent trois alignements NE-SW plurikilométrique. L'alignement au nord de la ville de Gatineau semble montrer le plus grand potentiel pour les ÉTR car on y retrouve a) plusieurs dykes de carbonatites et des fénites montrant des valeurs indicielles en ÉTR, b) une vaste zone d'affleurements de fénite (Fénites du ruisseau Noeux) et c) une large anomalie de potassium sur le levé radiométrique aérien possiblement associée à des fénites non cartographiées. Bien que les mesures de spectrométrie à rayon gamma et de susceptibilité magnétique ne permettent pas de distinguer les carbonatites avec des ÉTR élevés, elles devraient permettre de distinguer entre les fénites sodiques et les fénites potassiques.

Recommandations

Les recommandations pour la suite du projet sont les suivantes :

- Faire la caractérisation géochimique détaillée des échantillons prélevés afin d'évaluer les teneurs en portant un intérêt particulier aux éléments de terres rares et au niobium ainsi que de poursuivre l'examen de la relation entre les éléments radioactifs (K, U et Th), la susceptibilité magnétique et les éléments d'intérêts pour mieux circonscrire l'exploration;
- Faire la caractérisation pétrographique et minéralogique des échantillons par l'étude des lames minces en microscopie optique et au MEB afin de déterminer la distribution élémentaire des métaux d'intérêt dans les minéraux présents ainsi que déterminer la relation entre les minéraux principaux et les teneurs en ÉTR et Nb. Faire également la coloration aux carbonates et aux feldspaths potassiques de sections afin de distinguer les deux types de fénéisation et les types de carbonates;
- Réaliser une nouvelle campagne de terrain afin d'échantillonner les dykes connus qui ne l'ont pas été par cette étude. Il s'agit des dykes des carbonatites de Wakefield de Dupuy (1989), de Buckingham (Hogarth, 1997) et du lac à la Perdrix (Hogarth et van Breemen, 1996). De plus, les secteurs de l'anomalie de potassium (*figure 25*) ainsi que le secteur au sud de Val-des-Monts (présence de fénites d'après Hogarth (1997 - *figure 18*) devraient également être examinés.

Bibliographie

- Atencio, D., Andrade, M.B., Christy, A.G., Giere, R. et Kartashov, P.M., 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist* 48 (3) : 673–698.
- Ballouard, C., Poujol, M. Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R. et Vignerresse, J.-L., 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44 (3) : 231-234.
- Béland, R., 1977. Région de Wakefield. Ministère des Richesses naturelles du Québec. DP-461. 94 pages.
- Boily, M., Pilote, P. et Raillon, H., 1989. La métallogénie des métaux de haute technologie en Abitibi-Témiscamingue. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MB 89-29. 118 pages et 1 plan.
- Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., Munk, L. et McCauley, A.D., 2017. Lithium, Chapitre K. Dans: Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, et Bradley, D.C., édés., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802: K1– K21. <http://dx.doi.org/10.3133/pp1802K>
- Brisebois, D. et Brun, J., 1994. La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans : Géologie du Québec. Les Publications du Québec. MM 94-01 : 95-120.
- Černý, P., 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part II : Regional to global environments and petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18 (2) : 68-81.
- Černý, P. et Ercit, T.S., 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43 (6) : 2005–2026.
- Chagnon, J.Y., 1968. Régions des lacs des Quinze et barrière, comté de Témiscamingue. Ministère des Richesses naturelles du Québec. RG 134. 120 pages et 1 plan.
- Charbonneau, B.W. et Hogarth, D.D., 1988. Geophysical expression of the carbonatites and fenites east of Cantley, Quebec. Dans : Current Research, Part C. Geological Survey of Canada, Paper 88-1C : 259-269.
- Commission canadienne de sûreté nucléaire, 2021. <http://nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/radiation/introduction-to-radiation/radiation-doses.cfm>. Consulté le 19 octobre 2021.

- Corriveau, L. et Gorton, M., 1987. Potential economic significance of Precambrian potassic plutons in the Central Metasedimentary Belt, Grenville Province of western Quebec. Dans : Current Research, Part A. Geological Survey of Canada, Paper 87-1A : 897-899.
- Dupuy, H., 1989. Géologie de la région de Wakefield-Cascades. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. MB 89-19. 14 pages et 1 plan.
- Elliott, H.A.L., Wall, F., Chakhmouradian, A.R., Siegfried, P.R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A.A., Marks, M.A.W., Dowman, E. et Deady, E., 2018. Fenites associated with carbonatite complexes : a review. *Ore Geology Reviews*, 93 : 38-59.
- Ercit, T.S., 2005. REE-enriched granitic pegmatites. Dans : Linnen, R.L. et Samson, I.M., éd., Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17 : 175-199.
- Feng, R. et Kerrich, R., 1991. Single zircon age constraints on the tectonic juxtaposition of the Archean Abitibi greenstone belt and Pontiac Subprovince, Quebec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (11) : 3437-3441.
- Feng, R. et Kerrich, R., 1992. Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac Subprovince, Superior Province, Canada: Implications for tectonic history and source regions. *Chemical Geology*, 98 (1-2) : 23-70.
- Fleury, F., 2013. Prospection et rainurage, propriété Tansim. Matamec Exploration Inc. Rapport statutaire soumis au Gouvernement du Québec. GM 67780. 87 pages.
- Fleury, F. et Leclerc, A., 2008. Travaux de prospection phase II, propriété Tansim. Matamec Exploration Inc. Rapport statutaire soumis au Gouvernement du Québec. GM 63756. 61 pages.
- Gobeil, C., 1982. Campagne de prospection géologique et géochimique, Projet Delbreuil, SOQUEM. Rapport statutaire soumis au Gouvernement du Québec. GM 38848. 55 pages et 4 plans.
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J. et Galiegue, X., 2019. Re-Assessing the European Lithium Resource Potential – A Review of Hard-Rock Resources and Metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 109 : 494-519.
- Grenier, J. et Halle, L., 2008. Projection radiométrique, Delbreuil, Exploration Fieldex Inc., X-Terra Resources Corporation, Visible Gold Mines Inc. Rapport statutaire soumis au Gouvernement du Québec. GM 64594. 45 pages et 4 plans.

- Grenier, J. et Sansfaçon, R., 2010. Rapport de prospection REE 2009, Delbreuil, Exploration Fieldex Inc. Rapport statutaire soumis au Gouvernement du Québec. GM 64931. 38 pages et 1 plan.
- Haynes, W.M., 2016. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95e edition. CRC Press/Taylor and Francis. 2652 pages.
- Hébert, Y., 1988. Géologie de la région de Buckingham. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. DP 88-11. 1 plan annoté.
- Hocq, M. et Verpaelst, P., 1994. Les sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Dans : Géologie du Québec. Les Publications du Québec. MM 94-01 : 21-38.
- Hocq, M., 1994. La Province de Grenville. Dans : Géologie du Québec. Les Publications du Québec. MM 94-01 : 75-94.
- Hogarth, D.D., 1970. Geology of the southern part of Gatineau Park, National Capital Region. Geological Survey of Canada. Paper 70-20. 25 pages et 1 plan.
- Hogarth, D.D., 1981. Partie ouest de la région de Quinville, ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. DPV-816. 28 pages et 1 plan.
- Hogarth, D.D., 1997. Carbonatites, fenites and associated phenomena near Ottawa. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Ottawa'97, Field Trip A4, Guidebook, 21 pages.
- Hogarth, D.D., 2008. Rocks of the Masson - Buckingham - Mayo area, with emphasis on Mesoproterozoic igneous types. Rapport statutaire déposé au Gouvernement du Québec. GM 63238. 27 pages et 1 plan.
- Hogarth, D.D., 2016. Chemical trends in the Meech Lake, Québec, carbonatites and fenites. Canadian Mineralogist, 54 : 1105-1128.
- Hogarth, D.D., Chao, G. et Townsend, M.G., 1987. Potassium- and fluorine-rich amphiboles from the Gatineau area, Quebec. Canadian Mineralogist, 25 : 739-753.
- Hogarth, D.D., Hartree, R., Loop, J. et Solberg, T., 1985. Rare-earth element minerals in four carbonatites near Gatineau, Quebec. American Mineralogist, 70 : 1135-1142.
- Hogarth, D.D. et Rushforth, P., 1986. Carbonatites and fenites near Ottawa, Ontario and Gatineau, Québec. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada – Canadian Geophysical Union Joint Annual Meeting, Ottawa'86, Field Trip 9B, Guidebook, 22 pages.

- Hogarth, D.D., Rushforth, P. et McCorkell, R.H., 1988. The Blackburn carbonatites, near Ottawa, Ontario : dykes with fluidized emplacement. *Canadian Mineralogist*, 26 : 377-390.
- Hogarth, D.D. et van Breemen, O., 1996. Geology and age of the Lac à la Perdrix fenite, southern Gatineau district, Quebec. *Dans : Radiogenic age and isotopic studies, report 9. Geological Survey of Canada. Paper 1995-F : 33-41.*
- Jébrak, M. et Marcoux, E., 2008. Géologie des ressources minérales. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MM 2008-01, 667 pages.
- Lafleur, J. et Hogarth, D.D., 1981. Cambro-Proterozoic volcanism near Buckingham, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 (12) : 1817-1823.
- Linnen, R.L., Van Lichtervelde, M. et Černý, P., 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8 : 275-280.
- Lumbers, S.B., 1982. Summary of Metallogeny, Renfrew County Area; Ontario Geological Survey. Report 212. 58 pages et 4 plans.
- Machado, N., Gariépy, C., Philippe, S. et David, J., 1991. Géochronologie U-Pb du territoire québécois : Fosses du Labrador et de l'Ungava et Sous-province de Pontiac. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. MB 91-07. 50 pages.
- Madore, L., Globensky, Y., Kamal, N.M.S. et Giguère, E., 1994. Synthèse géologique de la région de Fort-Coulonge, SNRC 31F. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MB 94-39. 27 pages et 1 plan.
- MERN, 2012. Provinces géologiques du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. <https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/provinces-geologiques-8x11.pdf>
- MERN, 2020. Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025. Gouvernement du Québec. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/energie-ressources-naturelles/publications-adm/plan-strategique/PL_valorisation_mineraux_critiques_strategiques.pdf?1618857094
- MERN, 2021. Tableau des seuils anomaliques. Consulté le 2 novembre 2021. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/html/I3202_seuil.htm
- NRCan, 2021. Wakefield (Rad-Mag-EM, 1994, 1000m) et Cantley carbonatite (Rad-Mag-EM, 1983, 400m). Entrepôt de données géoscientifiques pour les données géophysiques. Consulté le 4 novembre 2021. <http://gdr.agg.nrcan.gc.ca>.

- Müller, A., Romer, R. L. et Pedersen, R. B., 2017. The Sveconorwegian Pegmatite Province – Thousands of Pegmatites Without Parental Granites. *Canadian Mineralogist*, 55 : 283–315.
- Parasnis, D.S., 1997. Principles of applied geophysics. Chapman and Hall, Londres, 429 pages.
- Perron, T. et Labranche, S., 2017. Indices Viau-Dallaire (Li-Ta) Lac Simard, Témiscamingue. Travail statutaire déposé au Gouvernement du Québec. GM69874. 10 pages et 1 plan.
- Richard, P.-L., 2021. NI 43-101 Technical Report, Tansim Property. Sayona Quebec. 124 pages.
<https://www.sayonaquebec.com/wp-content/uploads/2021/03/6015026-000000-40-ERA-0001-R00.pdf>
- Richardson, D.G. et Birkett, T.C., 1996. Gîtes associés à des carbonatites. Dans : Géologie des types de gîtes minéraux du Canada, O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair et R.I. Thorpe, éd. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, n° 8 : 601-619.
- Rive, M., 1975. Géologie des lacs Simard, Winawiash et Decelles (Comtés de Témiscamingue et Pontiac). Ministère des Richesses naturelles du Québec. DP-338. 15 pages et 4 plans.
- Rive, M., 1994. Inventaire des roches granitoides des sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Ministère des Ressources naturelles du Québec. MB 92-14. 185 pages.
- Rivers, T., Culshaw, N., Hynes, A., Indares, A., Jamieson, R. et Martignole, J., 2012, The Grenville Orogen – A postLITHOPROBE perspective, Chapter 3. Dans : Percival, J.A., Cook, F.A. et Clowes, R.M., éd., Tectonic Styles in Canada: the LITHOPROBE Perspective. Geological Association of Canada, Special Paper 49 : 97–236.
- Samoilov, V.S. et Smirnova, E.A., 1980. Behavior of rare earth elements in carbonatite formation and some genetic aspects of carbonatites. *Geochemistry*, 18 : 1844–1858.
- Sappin, A.-A. et Beaudoin, G., 2015. Classification des principaux indices en éléments de terres rares au Québec (Canada) : contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. MB 2015-10. 76 pages.
- Selway, J.B., Breaks, F.W. et Tindle, A.G., 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. *Exploration and Mining Geology*, 14 (1-4) : 1-30.
- SIGÉOM, 2021. Carte interactive. Consulté le 26 octobre 2021.
https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr.

- Simandl, G.J., Burt, R.O., Trueman, D.L. et Paradis, S., 2018. Economic geology models 2. Tantalum and niobium : deposits, resources, exploration methods and market-a primer for geoscientists. *Geoscience Canada*, 45 : 85-96.
- Simandl, G.J. et Paradis, S., 2018. Carbonatites : related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. *Applied Earth Science*, 127 (4) : 123-152.
- Simmons, W. B. S. et Webber, K. L., 2008. Pegmatite genesis : state of the art. *European Journal of Mineralogy*, 20 (4) : 421-438.
- Sinaei-Esfahani, F., 2013. Localized metasomatism of Grenvillian marble leading to its melting, Autoroute 5 near Old Chelsea, Quebec. Mémoire de maîtrise, Université McGill (Canada). 133 pages.
- Spence, H.S., 1920. Phosphate in Canada. Government of Canada. Department of Mines, Mines Branch Publication 396. 182 pages et 13 plans.
- Steiner, B., 2019. Tools and workflows for grassroots Li-Cs-Ta (LCT) pegmatite exploration. *Minerals*, 9 (8). <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/8/499/htm>
- Tarnocai, D. M., 1997. Petrogenesis of the Late Archean Lac Simard Intrusive Complex, Pontiac Subprovince, Quebec. Mémoire de maîtrise, Université d'Ottawa (Canada). 324 pages.
- Théberge, J., 1986. Cartographie géotechnique dans la région de Gatineau – Aylmer – Hull. Ministère de l'Énergie et des Ressources. MB 86-43. 200 pages et 4 plans.
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, R.R., II, Long, K.R. et Gambogi, J., 2017. Rare-earth elements, Chapitre O. Dans : Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II et Bradley, D.C., édés., *Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802 : O1– O31.
- Wilson, M.E., 1920 — Buckingham; Hull and Labelle Counties, Quebec. Geological Survey of Canada. Map 1691. Carte avec annotations.
- Zharikov, V A, Pertsev, N N, Rusinov, V L, Callegari, E, et Fettes, D J., 2007. A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 9. Metasomatic rocks. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. 17 pages.



Marc Legault, géo., Ph. D.

OGQ n° 00756

Annexe A

**Paramètres techniques des mesures
géophysiques**

Le spectromètre à rayon gamma RS-125 mesure la radioactivité dans une sphère d'environ 50 cm de rayon autour du capteur. Il est donc nécessaire d'effectuer les mesures sur une surface suffisamment grande, l'angle de la surface importe peu. L'appareil mesure le débit de dose (« dose rate ») en nSv/h⁴, ainsi que la teneur en K (en %) et en eU et eTh (en ppm)⁵. Les corrections et un étalonnage interne se font automatiquement à chaque mesure. Afin de s'assurer que les mesures de l'appareil ne dérivent pas dans le temps, une mesure est effectuée chaque matin au même endroit. L'appareil dispose d'un mode d'acquisition de mesure qui permet de compter la radioactivité pendant une période variable⁶ sur une zone fixe, mais également d'un mode « prospection » qui mesure la radioactivité instantanée, permettant de repérer facilement les zones les plus radioactives.

L'appareil de mesure de susceptibilité magnétique KT-10 a été utilisé sur des échantillons choisis. Cet appareil présente les résultats en $\times 10^{-3}$ SI où 40×10^{-3} SI \cong 1% magnétite (Parasnis, 1997). Afin de s'assurer de la véracité des mesures, les étalons « UL MOI » ($77,93 \times 10^{-3}$ SI) et « UL LOI » ($26,92 \times 10^{-3}$ SI) du Groupe d'Instrumentation Géophysique de l'Université de Laval ont été mesurés 10 fois chacun tous les 4 h environ. Les mesures sur échantillon ont ensuite été effectuées au nombre de 3 sur 3 faces planes différentes, permettant d'obtenir une moyenne de la susceptibilité magnétique sur 9 mesures par échantillon. Les mesures n'ont pas été prises sur le terrain, car nous ne disposions pas de l'appareil durant la campagne d'échantillonnage.

⁴ Le sievert (Sv) est l'unité utilisée pour donner une évaluation de l'impact des rayonnements sur l'homme. La dose efficace moyenne de rayonnement naturel au Québec est d'environ 180 nSv/h (Commission canadienne de sûreté nucléaire, 2021).

⁵ Les mesures pour l'uranium et le thorium sont faites respectivement sur le bismuth 214 et thallium 208 qui sont des produits filles et donc les teneurs qui sont exprimées en équivalent uranium (eU) et thorium (eTh) présument un équilibre dans la chaîne de désintégration.

⁶ Nous avons utilisé un temps d'acquisition de 120 secondes qui est un compromis entre temps d'acquisition et représentativité statistique de la mesure.