

Projet Terres Rares au Québec; Rapport intermédiaire d'avancement des travaux

Anne-Marie Beauchamp, Anne-Aurélié Sappin, Georges Beaudoin,
Caitlin Beland, William Chartier-Montreuil, Frédéric Fleury, Pengzhi Zhao,
Anthony E. Williams-Jones, Sarah Dare, Sarah-Jane Barnes, Ross Stevenson,
Marc Constantin, Michel Chouteau, Christian Dupuis et Li Zhen Cheng

MB 2016-05

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.



PROJET TERRES RARES AU QUÉBEC
RAPPORT INTERMÉDIAIRE D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Beauchamp, A.-M., Sappin, A.-A., Beaudoin, G., Beland, C., Chartier-Montreuil, W., Fleury, F.,
Zhao, P., Williams-Jones, A.E., Dare, S., Barnes, S.-J., Stevenson, R., Constantin, M., Chouteau, M.,
Dupuis, C., Cheng, L.Z.

Réseau Divex – Université Laval
1^{er} mars 2016

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux	4
Introduction	5
Définition des éléments des terres rares	6
Les gîtes d'éléments des terres rares au Canada et au Québec.....	6
Objectifs du projet terres rares au Québec.....	11
Partenaires du projet terres rares au Québec.....	11
Études de cas	12
1. Projet: Ashram	12
1.1 Présentation du projet	12
1.2 Objectifs du projet.....	18
1.3 Travaux réalisés	18
1.4 Liste des publications et communications.....	20
2. Projet: Lac à Paul	21
2.1 Présentation du projet	21
2.2 Objectifs du projet.....	22
2.3 Travaux réalisés	22
2.4 Liste des publications et communications.....	26
3. Projet: Kipawa	27
3.1 Présentation du projet	27
3.2 Objectifs du projet.....	29
3.3 Travaux réalisés	30
3.4 Liste des publications et communications.....	31
Projets intégrateurs.....	32
4. Projet: Étude pétrophysique/géophysique des gîtes de terres rares au Québec	32
4.1 Présentation du projet	32
4.2 Objectifs du projet.....	32
4.3 Travaux réalisés	33
4.4 Liste des publications et communications.....	33
Projet: Signature isotopique des gîtes d'éléments des terres rares au Québec	34
5.1 Présentation du projet	34
5.2 Objectifs du projet.....	34
5.3 Travaux réalisés	34
5.4 Liste des publications et communications.....	36
Conclusion.....	38
Références	40

Liste des figures

Figure 1: Localisation des éléments des terres rares dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïv	7
Figure 2: Matières premières critiques (U.S. department of Energy, 2010).....	8
Figure 3: Localisation des projets d'exploration d'ETR les plus avancés au Canada (Ressources naturelles Canada, 2013).....	9
Figure 4: Localisation des principales minéralisations en ETR au Québec. 1- Gîte Ashram (propriété Eldor), 2- Gîte Strange Lake, 3- Gîte Misery Lake, 4- Propriété Kwyjibo, 5- Gîte Montviel, 6- Gîte Lac Shortt, 7- Gîte Grande-Vallée, 8- Indice Haltaparche, 9- Gîte Kipawa, 10- Indice Baie-Mercier, 11- Indice Wares, 12- Mine St-Lawrence Columbium et gîte Niocan (d'après Sappin et Beaudoin, 2016).	10
Figure 5: Principaux partenaires du projet terres rares mené par le réseau d'innovation DIVEX et le MERN	11
Figure 6: Cailtin Beland, étudiante au doctorat à l'Université McGill (à gauche) et Anthony E. William Jones (à droite).....	12
Figure 7: Carte géologique régionale du sud-est de la Province de Churchill et localisation de la propriété Eldor (gîte Ashram) (d'après Gagnon et al., 2015).....	14
Figure 8: Carte géologique simplifiée du complexe de carbonatite d'Eldor (d'après Schmidt, 2013)	15
Figure 9: Classification des carbonatites du gîte Ashram selon Gittins et Harmer (1997). Les flèches indiquent les variations de composition des bordures (rim) vers le centre (core) de la carbonatite.....	16
Figure 10: Modèle 3D des zones minéralisées du gîte Ashram (vue vers l'ouest) (d'après Gagnon et al., 2015)	17
Figure 11: Principales zones minéralisées du gîte Ashram. A) Carottes de forage du trou EC10-028 qui montrent l'aspect des différentes zones minéralisées (Zone A, B, BD et Contact). Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources (Gagnon et al., 2015), B) Carottes de forage typiques de la zone A. La zone A représente la minéralisation la plus typique du gîte Ashram. Les unités dans cette zone sont des magnésio- et des ferro-carbonatites riches en ferrodolomite de couleur gris-verdâtre pâle à foncé et contenant des fragments de sidérite magnésienne, de fluorite et, localement, de monazite (Gagnon et al., 2015). La minéralisation (2,43% TREO) est très finement disséminée dans la monazite et la fluorite. Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources, C) Carottes de forage typiques de la zone B. La minéralisation (2,07% TREO) est très finement grenue et se retrouve dans la monazite. Dans cette section de forage, la monazite est très abondante et donne une teinte jaunâtre à la roche (Gagnon et al., 2015). Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources, D) Carottes de forage typiques de la zone BD. La minéralisation en rose se trouve dans les fluorocarbonates (bastnäsité, synchysite et parisite). En général, la zone BD est moins minéralisée que les zones A et B, mais elle contient une plus grande variété de carbonates riches en ETR et en F (Gagnon et al., 2015). Diamètre de la carotte: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources.	19
Figure 12: En haut: William Chartier-Montreuil, étudiant à la maîtrise, Université d'Ottawa (à gauche), Sarah Dare (à droite). En bas: Sarah-Janes Barnes (à gauche) et Ross Stevenson (à droite).....	21

Figure 13: Carte de la géologie régionale du secteur du Lac-à-Paul. Les lignes noires marquent le contour de la propriété et les noms sur la carte représentent les indices minéralisés (d'après Cimon et Hébert, 1998).....	23
Figure 14: Enveloppes minéralisées du gisement du Lac à Paul (d'après Ariane Phosphate Inc., 2015)	24
Figure 15: Principaux lithofaciès du gisement du Lac à Paul. A) Péridotite nelsonitique massive, B) Gabbronorite nelsonique, C) Zone de mélange, D) Apatite grossière. Pointe du crayon: 1,2 cm. Photographies: William Chartier-Montreuil.	25
Figure 16: En haut: Frédéric Fleury, étudiant à la maîtrise, Université Laval (à gauche), Marc Constantin (à droite). En bas: Ross Stevenson	27
Figure 17: Carte géologique régionale du gîte de Kipawa et colonne stratigraphique (d'après Saucier et al., 2013). Les datations U-Pb sur zircons sont tirées de Currie et Breeman (1996) et Breeman et Currie (2004).	28
Figure 18: Exemples de minéraux contenant des ETR au gîte de Kipawa. A) Carottes de forage montrant plusieurs grains d'eudialyte en rose. Diamètre de la carotte: 4,7 cm, B) Échantillon de syénite pegmatitique contenant de l'eudialyte et de l'agrellite. Pointe du crayon: 1cm, C) Vlasovite, gittinsite et eudialyte. Largeur de la photographie: 4 cm. Photographies: Frédéric Fleury.	29
Figure 19: Zones minéralisées du gîte de Kipawa (d'après Saucier et al., 2013).....	30
Figure 20: En haut: Pengzhi Zhao, étudiant au doctorat, École polytechnique de Montréal (à gauche), Michel Chouteau (à droite), En bas: Christian Dupuis (à gauche) et Li Zhen Cheng (à droite).....	32
Figure 21: Anne-Aurélié Sappin, chercheure postdoctorale, Université Laval (à gauche) et Georges Beaudoin (à droite)	34
Figure 22: Carbonatite dolomitique du complexe de carbonatite de Saint-Honoré, mine Niobec (Québec), B) Veines/veinules d'apatite et britholite recoupant un gneiss à biotite, hornblende, plagioclase et magnétite dans l'horizon Josette, propriété Kwyjibo (Québec). Photographies: Anne-Aurélié Sappin.	36

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des échantillons de roches hôtes des gîtes d'ETR collectés pour analyse isotopique.....	35
Tableau 2: Tableau récapitulatif des équipes de recherche, des partenaires corporatifs et de la date de début de chaque sous-projet par ordre chronologique	39

Introduction

L'émergence des technologies de l'information, des communications numériques et des technologies énergétiques dites vertes (e.g. éoliennes, voitures hybrides) a bouleversé l'économie de marché et les rapports entre les nations. Certains métaux autrefois peu utilisés se révèlent aujourd'hui indispensables, voir même irremplaçables. Les éléments des terres rares (ETR) font partis de ces nouveaux métaux d'intérêt. En raison de leur propriété magnétique et fluorescente, ils entrent dans la composition de plusieurs matériaux de hautes technologies, tel que les téléphones intelligents, les lumières LED ou les aimants. L'approvisionnement en ETR est donc d'une importance capitale. La Chine qui détient depuis les 20 dernières années le quasi-monopole de la production en ETR (environ 85% de la production mondiale en 2014; Gambogi, 2015) a réduit significativement ses quotas d'exportation à la fin des années 2000. Ces actions ont causé de fortes inquiétudes sur l'offre future et s'en est suivi une ruée sans précédent dans la recherche de nouveaux gisements exploitables à l'extérieur de la Chine. Le Québec qui contient de nombreux gîtes et indices d'ETR pourrait représenter une excellente alternative pour la recherche de nouvelles sources en terres rares. Dans le but d'améliorer la compréhension du mode de mise en place des minéralisations en ETR et de développer de nouvelles méthodes d'exploration qui augmenteront les probabilités de découvertes économiques au Québec, le réseau d'innovation DIVEX et le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) ont lancé en 2013 un projet de recherche sur les ETR au Québec. Ce projet de recherche multidisciplinaire, d'une durée de 5 ans, comprend 3 études de cas et 2 projets intégrateurs. Les études de cas portent sur les gîtes d'Ashram, du Lac à Paul et de Kipawa. Elles serviront à mieux comprendre les concepts fondamentaux qui contrôlent la genèse des minéralisations en ETR. Les projets intégrateurs visent, quant à eux, à documenter la signature pétrophysique et géophysique et la signature isotopique en Sm-Nd des principaux gîtes d'ETR au Québec.

Ce rapport intermédiaire fait état de l'avancement des travaux de terrain et de laboratoire du projet terres rares qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016. Il se divise en 5 sections, chacune correspondant à l'un des 5 sous-projets. Les résultats préliminaires des différents travaux ne sont pas traités dans ce rapport.

Définition des éléments des terres rares

Les éléments des terres rares, tel que définis par l'I.U.P.A.C. (International Union of Pure and Applied Chemistry), constituent un groupe de 17 éléments (15 lanthanides, scandium (Sc) et yttrium (Y); Figure 1) qui se comportent chimiquement de façon similaire. Ils sont généralement subdivisés en deux grandes catégories, soit les terres rares légères (LREE = light rare earth elements) qui incluent le lanthane (La), le cérium (Ce), le praséodyme (Pr), le néodyme (Nd), le prométhium (Pm), le samarium (Sm) et l'euporium (Eu), et les terres rares lourdes (HREE = heavy rare earth elements) qui comprennent le gadolinium (Gd), le terbium (Tb), le dysprosium (Dy), l'holmium (Ho), l'erbium (Er), le thulium (Tm), l'ytterbium (Yb) et le lutécium (Lu) (Figure 1). Les éléments de cette dernière catégorie sont moins abondants dans la croûte terrestre, plus dispendieux et donc plus recherchés. Certains auteurs préfèrent toutefois subdiviser les éléments des terres rares en trois groupes distincts, incluant les terres rares légères (La à Pm), les terres rares intermédiaires (MREE = middle rare earth elements; Sm à Gd) et les terres rares lourdes (Tb à Lu). D'un point de vue économique, les éléments des terres rares appartiennent aux matières premières critiques tel que définies par l'Union Européenne en 2010 (European commission, 2010). Aussi, si la tendance se maintient, la demande en ETR pourrait bientôt dépasser l'offre, plus particulièrement dans le cas des terres rares lourdes comme Dy, Tb, Nd, Eu et Y (U.S. department of Energy, 2010; Figure 2).

Les gîtes d'éléments des terres rares au Canada et au Québec

Présentement, la Canada n'est pas un pays producteur d'éléments des terres rares mais sa situation est très prometteuse. Il y a plus de 200 projets d'exploration minière au pays qui visent la découverte de gîtes et éventuellement de gisements de terres rares (Ressources naturelles Canada, 2013). Plusieurs projets sont d'ailleurs à des stades d'exploration et de développement avancés (Figure 3). D'après le recensement effectué par Ressources naturelles Canada en 2013 des projets d'exploration concernant les minéralisations en ETR, tout stade de développement confondu, 73 projets ont été identifiés au Québec, 39 en Ontario, 38 en Colombie-Britannique, 21 à Terre-Neuve-et-Labrador, 9 au Saskatchewan, 8 au Nouveau-Brunswick, 7 au Manitoba, 4 en Nouvelle-Écosse, 3 au Yukon, 2 dans les Territoires du Nord-Ouest et 2 au Nunavut. Ainsi, en 2013, 35% des projets

se trouvaient au Québec, ce qui en fait la province la plus prospective pour la recherche de minéralisation en ETR au Canada (Ressources naturelles Canada, 2013).

Numéro atomique Poids atomique

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulphur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	71 Lu Lutetium	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	103 Lr Lawrencium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Unnamed	111 Unamed							
Terres rares légères (LREE)										Terres rares lourdes (HREE)							
57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium				
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium				

La couleur du symbole de chaque élément indique son état à 298 K (noir = solide, bleu = liquide, rouge = gazeux).
Les symboles en remplissage blanc avec un contour noir indiquent que ces éléments ne sont pas présents naturellement dans la nature.

Figure 1: Localisation des éléments des terres rares dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïv

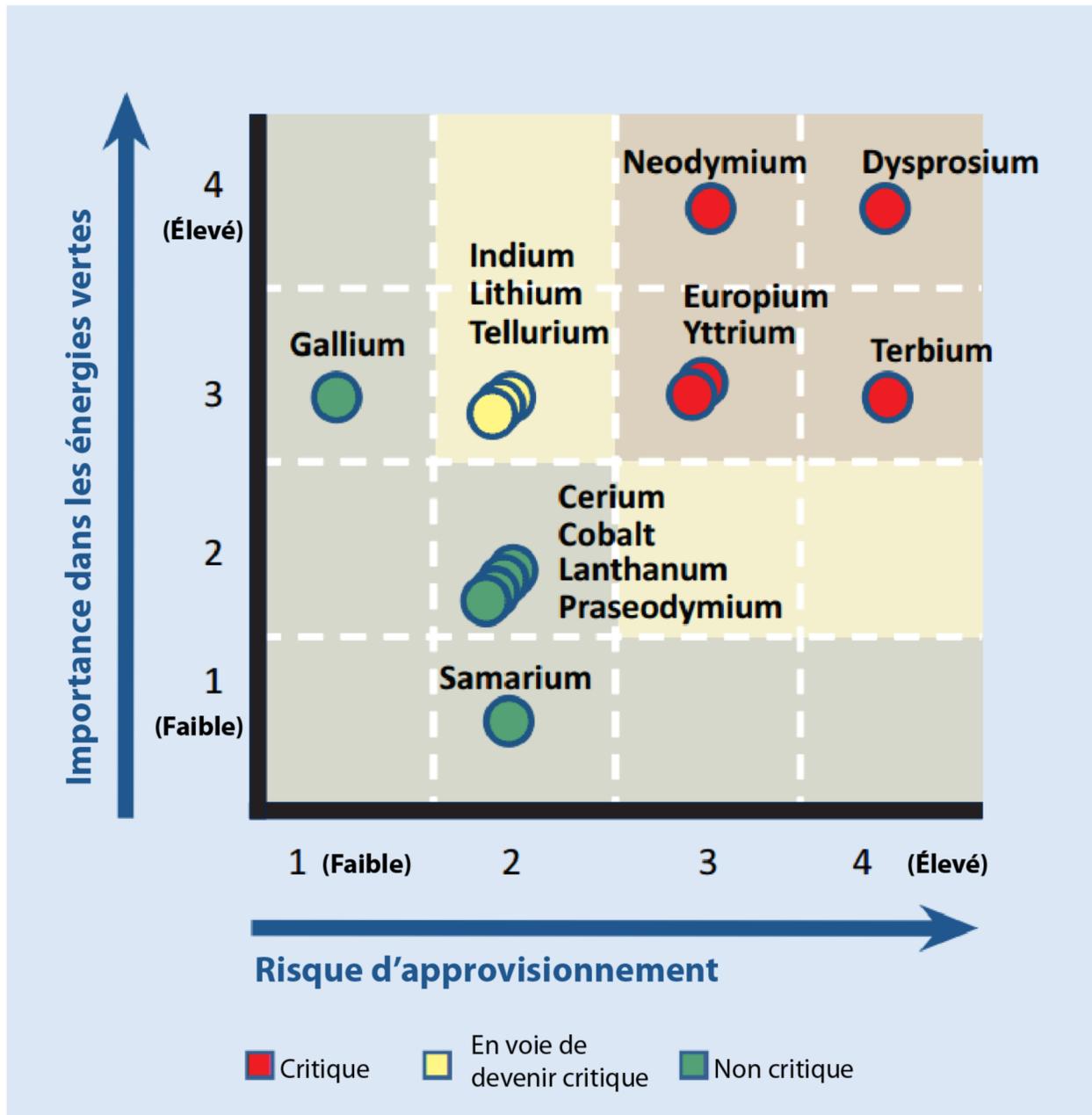


Figure 2: Matières premières critiques (U.S. department of Energy, 2010)

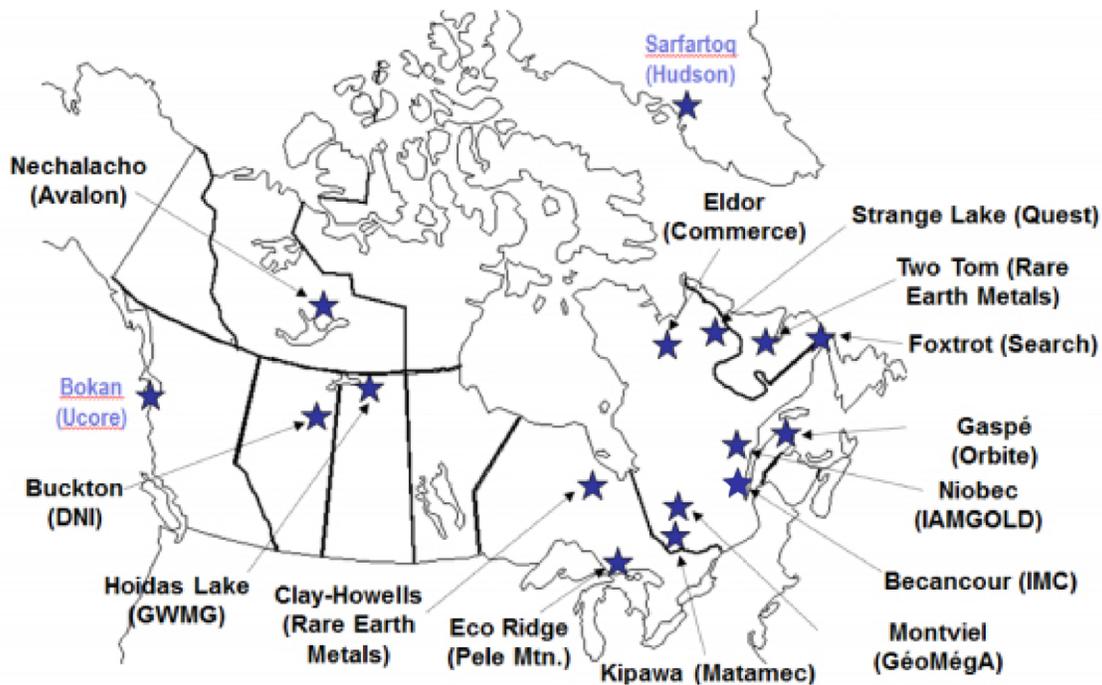


Figure 3: Localisation des projets d'exploration d'ETR les plus avancés au Canada (Ressources naturelles Canada, 2013)

En plus de la grande quantité de projets d'exploration minérale sur son territoire, le Québec présente une grande diversité d'indices et de gîtes d'ETR. Ces indices et gîtes ont été subdivisés en 6 grands types selon leur association génétique et le type de roche hôte (Sappin et Beaudoin, 2015; Sappin et Beaudoin, 2016 d'après Gosselin, 2003 et Boily et Gosselin, 2004; Figure 4), soit 1) les gîtes primaires (formés par des processus magmatiques et/ou hydrothermaux) associés aux complexes de carbonatite, 2) les gîtes primaires associés aux roches ignées peralcalines, 3) les gîtes primaires d'oxydes de fer-Cu-Au-ETR de types Kiruna ou Olympic Dam, 4) les gîtes primaires, non reliés aux roches ignées alcalines, comme les pegmatites, les skarns et les veines polymétalliques à quartz et fluorite, 5) les gîtes secondaires (formés par des processus sédimentaires et du lessivage) de type placer et paléoplacer et 6) les gîtes secondaires encaissés dans des argiles à adsorption ionique. Parmi ces différents types de minéralisation en ETR, les gîtes d'origine primaire associés aux complexes de carbonatite (e.g. Ashram), aux roches ignées peralcalines (e.g. Kipawa), et aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au semblent les plus prometteurs (Sappin et Beaudoin, 2015; Sappin et Beaudoin, 2016). Mais de nouveaux types de gîte pourraient également présenter un intérêt économique dans le futur, tel que le gîte de Lac à Paul associé à la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean.

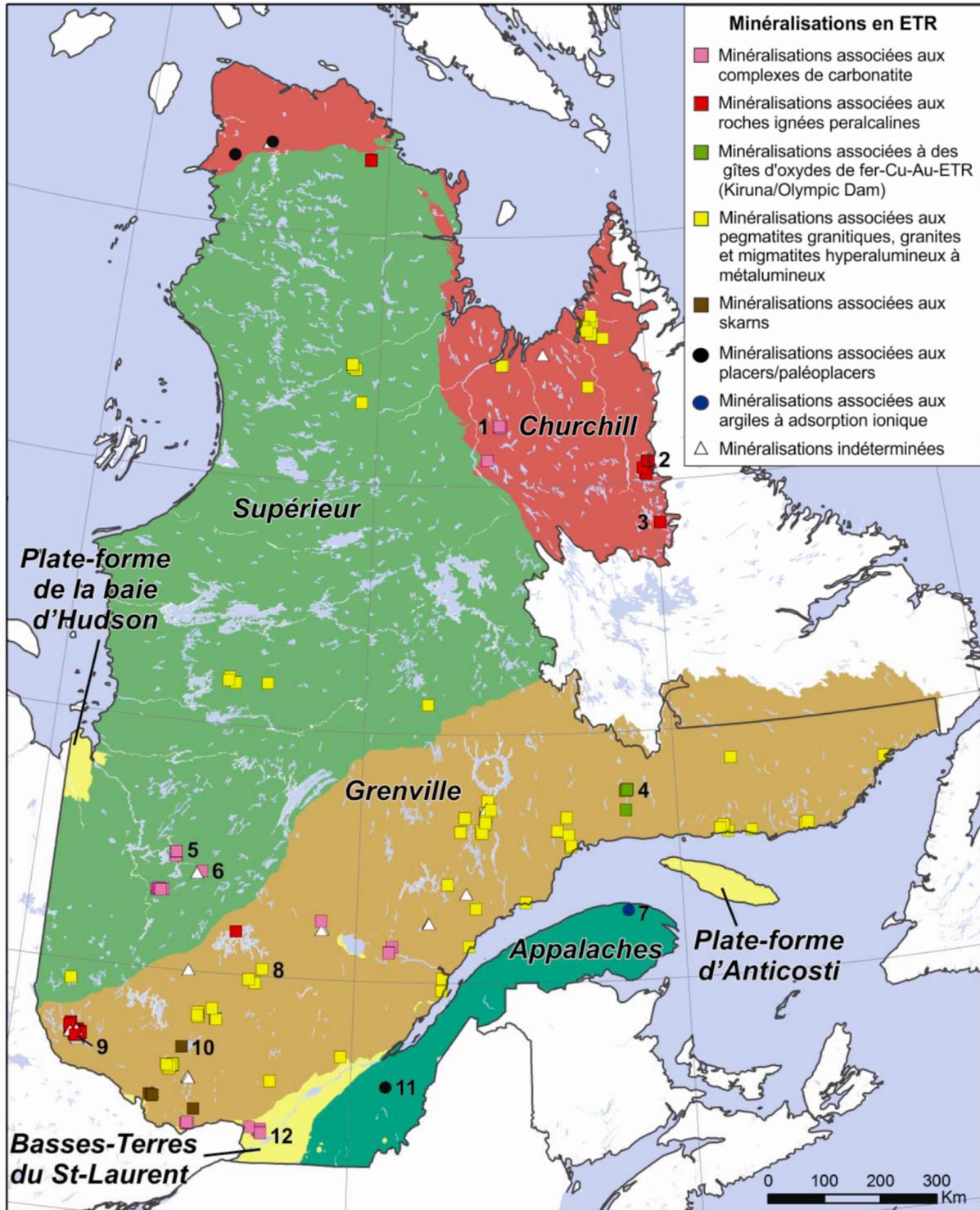


Figure 4: Localisation des principales minéralisations en ETR au Québec. 1- Gîte Ashram (propriété Eldor), 2- Gîte Strange Lake, 3- Gîte Misery Lake, 4- Propriété Kwyjibo, 5- Gîte Montviel, 6- Gîte Lac Shortt, 7- Gîte Grande-Vallée, 8- Indice Haltaparche, 9- Gîte Kipawa, 10- Indice Baie-Mercier, 11- Indice Wares, 12- Mine St-Lawrence Columbium et gîte Niocan (d'après Sappin et Beaudoin, 2016).

Objectifs du projet terres rares au Québec

Les objectifs spécifiques du projet terres rares sont les suivants:

- Reconstruire l'évolution magmatique des intrusions enrichies en ETR
- Déterminer les concentrations en ETR durant la cristallisation fractionnée
- Établir la nature et l'origine des fluides hydrothermaux responsables de l'altération et de la redistribution des éléments des terres rares et documenter les conditions physico-chimiques de ces fluides
- Établir le cadre géodynamique favorable à la formation des différents types de minéralisation en ETR au Québec
- Établir les caractéristiques pétrophysiques des différents types de minéralisation en ETR au Québec
- Développer des modèles géophysiques raffinés pour détecter les gîtes d'ETR et/ou leurs roches encaissantes au Québec

Partenaires du projet terres rares au Québec

Les principaux partenaires impliqués dans le projet terre rares de DIVEX/MERN sont Commerce Resources, Ariane Phosphate, Matamec Explorations, Abitibi Géophysique et Mitacs (Figure 5).

Partenaires



Figure 5: Principaux partenaires du projet terres rares mené par le réseau d'innovation DIVEX et le MERN

Études de cas

1. Projet: Ashram

1.1 Présentation du projet

Titre du projet:

Origine de la minéralisation en terres rares dans le complexe de carbonatite d'Eldor, Québec, Canada

Par: *Caitlin Beland*, étudiante au doctorat, Université McGill (Figure 6)

Superviseur: *Anthony E. William Jones*, Université McGill (Figure 6)

Date de début du projet: Janvier 2015



Figure 6: Caitlin Beland, étudiante au doctorat à l'Université McGill (à gauche) et Anthony E. William Jones (à droite)

La propriété Eldor se situe dans la partie centrale de la Fosse du Labrador (Québec), à environ 130 km au sud de la communauté de Kuujuaq (Figure 7). Elle est localisée à proximité de deux zones lithotectoniques qui sont séparées par une faille de chevauchement majeure (Laferrière, 2011; Gagnon et al., 2015; Figure 7). À l'est de la faille se trouve des roches d'âge Protérozoïque, principalement des paragneiss, des paraschistes et des amphibolites. À l'ouest de la faille, on retrouve la zone Gerido qui comprend les roches pyroclastiques mafiques, les basaltes, les dolomites et les gabbros appartenant au Groupe de Doublet. Ces roches plus anciennes se trouvent stratigraphiquement sous les rhyolites, rhyodacites, tufs, dolomites, shales, pélites mudstones et conglomérats composant le Groupe de Le Moyne (Laferrière, 2011; Gagnon et al., 2015). La Carbonatite d'Eldor (aussi appelée intrusion de Le Moyne) a été mise en place dans les roches du Groupe de Le Moyne. Elle constitue l'encaissant de l'indice Ashram, indice minéralisé en ETR qui contient 29,3 Mt à 1,90% total des oxydes de terres rares (TREO = total rare earth oxide) de ressources mesurées et indiquées et 219,8 Mt à 1,88% TREO de ressources présumées (Gagnon et al., 2015).

La carbonatite d'Eldor a une forme elliptique d'environ 15 km de long par 4 km de large (Clark et Wares, 2006; Gagnon et al., 2015; Figure 8). Sa mise en place, possiblement polyphasée, a eu lieu

à la fin du deuxième cycle de formation de la ceinture orogénique du Nouveau-Québec, entre 1,88 et 1,87 Ga (Gagnon et al., 2015). La carbonatite d'Eldor a une composition complexe (Figures 8 et 9). Il est possible de la subdiviser selon les lithologies présentes (calcio-carbonatite, magnésio-carbonatite et ferro-carbonatite) (Wright et al., 1998; Figure 9), selon la position des centres éruptifs (Demers et Blanchet, 2002) ou selon les relations de recoupement et la chronologie de mise en place des phases intrusives ou extrusives (Gagnon et al., 2015). De manière générale, le complexe intrusif d'Eldor se divise en trois grands groupes: les carbonatites pré-, intermédiaires ou tardives dans l'histoire géologique (Gagnon et al., 2015).

Les métaux présents sur la propriété Eldor sont le tantale (Ta), le niobium (Nb) et les éléments des terres rares. Ta et Nb se trouvent respectivement dans le pyrochlore et la colombite (Laferrière, 2011; Gagnon et al., 2015). Les éléments des terres rares sont retrouvés presque essentiellement dans la monazite (La-Ce), et plus rarement dans la bastnäsite (La-Ce), la parisite (Ce), la synchysite (Ce) et le xenotime (Y-Dy) (Laferrière, 2011; Gagnon et al., 2015). Le phosphate présent dans l'apatite et le fluor associé à la fluorite font partis des minéralisations secondaires de la propriété (Gagnon et al., 2015). Les carbonatites intermédiaires sont étroitement liées aux minéralisations en Ta et Nb tandis que les carbonatites tardives, situées au centre du complexe, sont les hôtes principaux des minéralisations en terres rares (Gagnon et al., 2015). La carbonatite d'Eldor est divisée en zones minéralisées selon leurs teneurs en ETR (Gagnon et al., 2015; Figures 10 et 11). Les zones A et B contiennent typiquement 1,5 à 3% et plus de TREO et sont généralement entourées par un halo de plus faible teneur (<1% TREO) nommé zone BD (Gagnon et al., 2015). En bordure de la zone BD, on observe une zone riche en phlogopite, albite et amphibole non minéralisée. À proximité de la surface, au centre du complexe, on retrouve une zone enrichie en terres rares intermédiaires et lourdes qui se nomme MHREO (Gagnon et al., 2015).

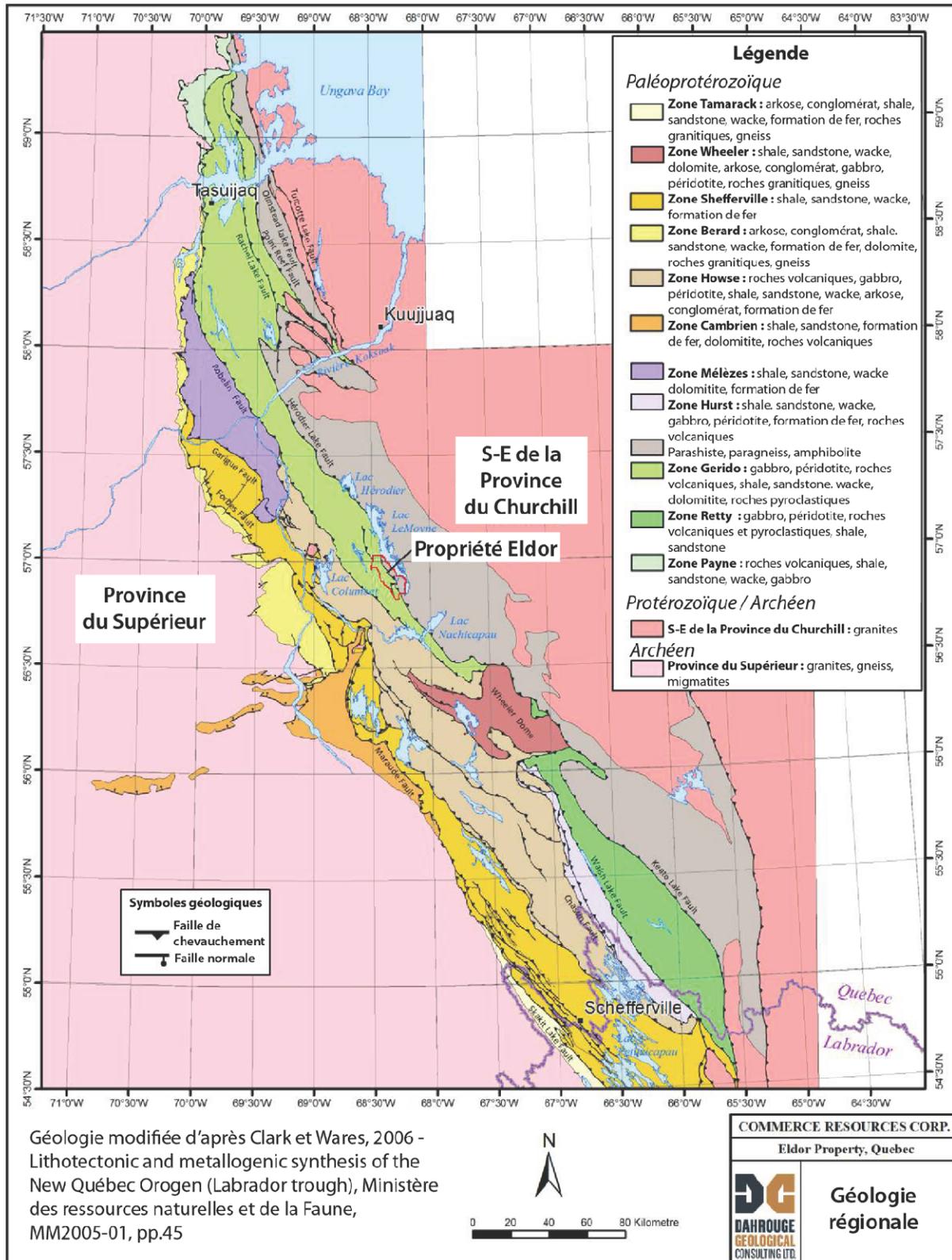
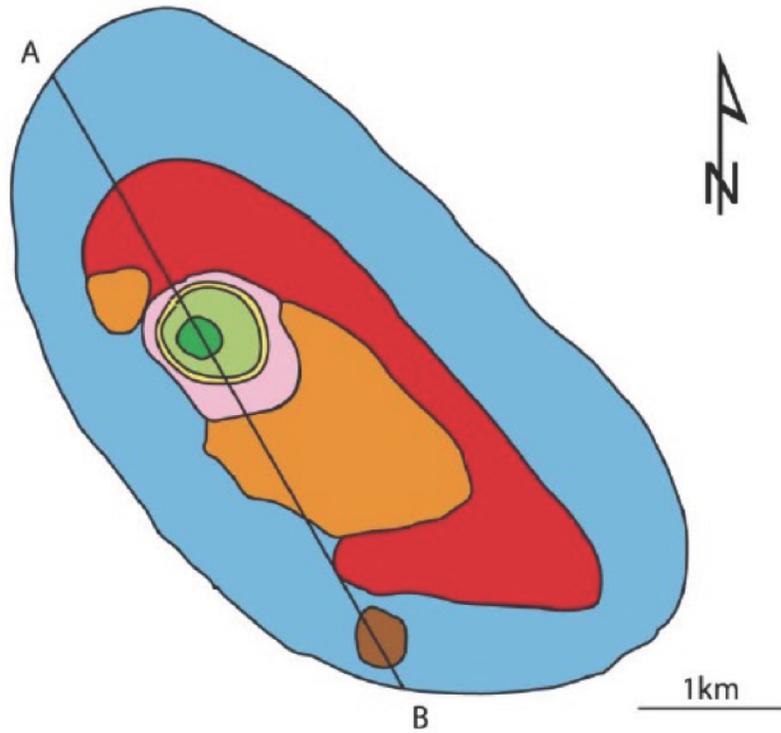


Figure 7: Carte géologique régionale du sud-est de la Province de Churchill et localisation de la propriété Eldor (gîte Ashram) (d'après Gagnon et al., 2015)



Légende

 Roches à quartz-albite-amphibole sodique ("fenite") et dykes carbonatitiques	 Carbonatite à REE-fluorocarbonate-dolomite-ankérite
 Roches à apatite-magnétite	 Carbonatite à monazite-dolomite-ankérite
 Carbonatite à calcite et dykes phoscorite	 Carbonatite à monazite-sidérite-ankérite
 Carbonatite à pyrochlore-dolomite	 Carbonatite à monazite-ankérite-sidérite

Figure 8: Carte géologique simplifiée du complexe de carbonatite d'Eldor (d'après Schmidt, 2013)

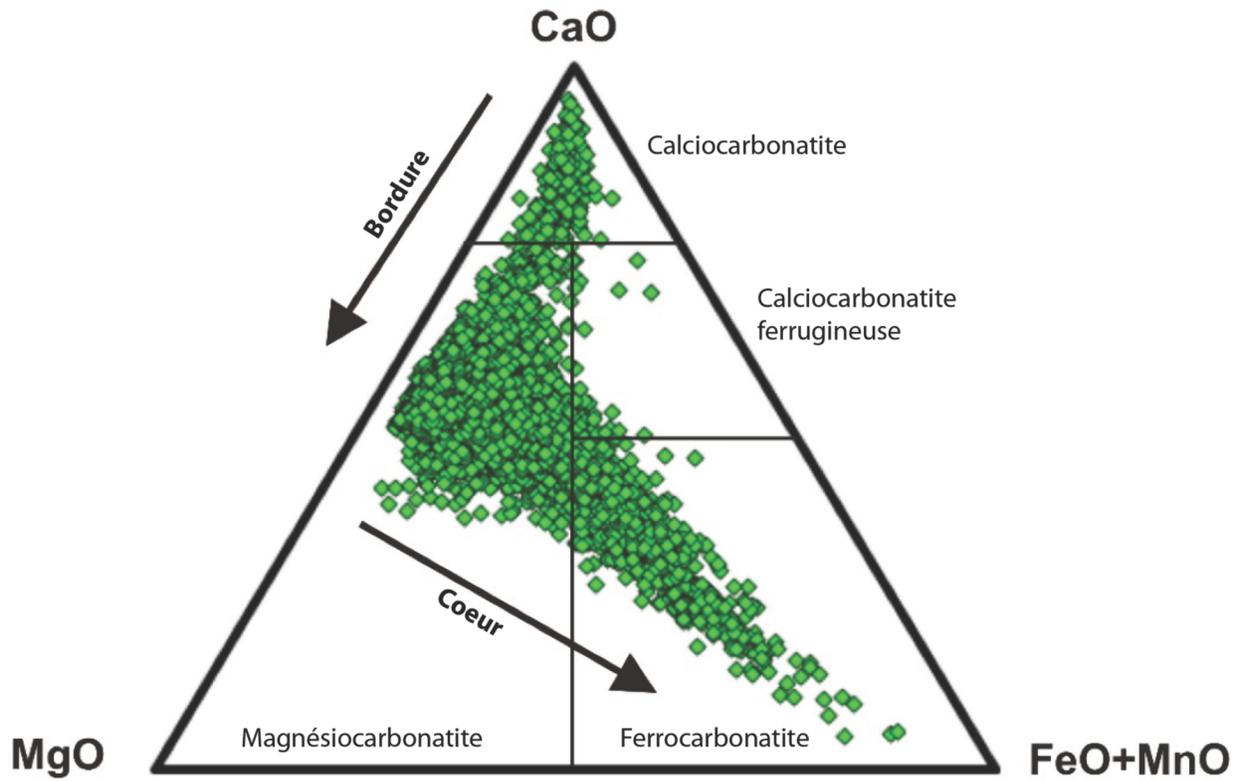


Figure 9: Classification des carbonatites du gîte Ashram selon Gittins et Harmer (1997). Les flèches indiquent les variations de composition des bordures (rim) vers le centre (core) de la carbonatite.

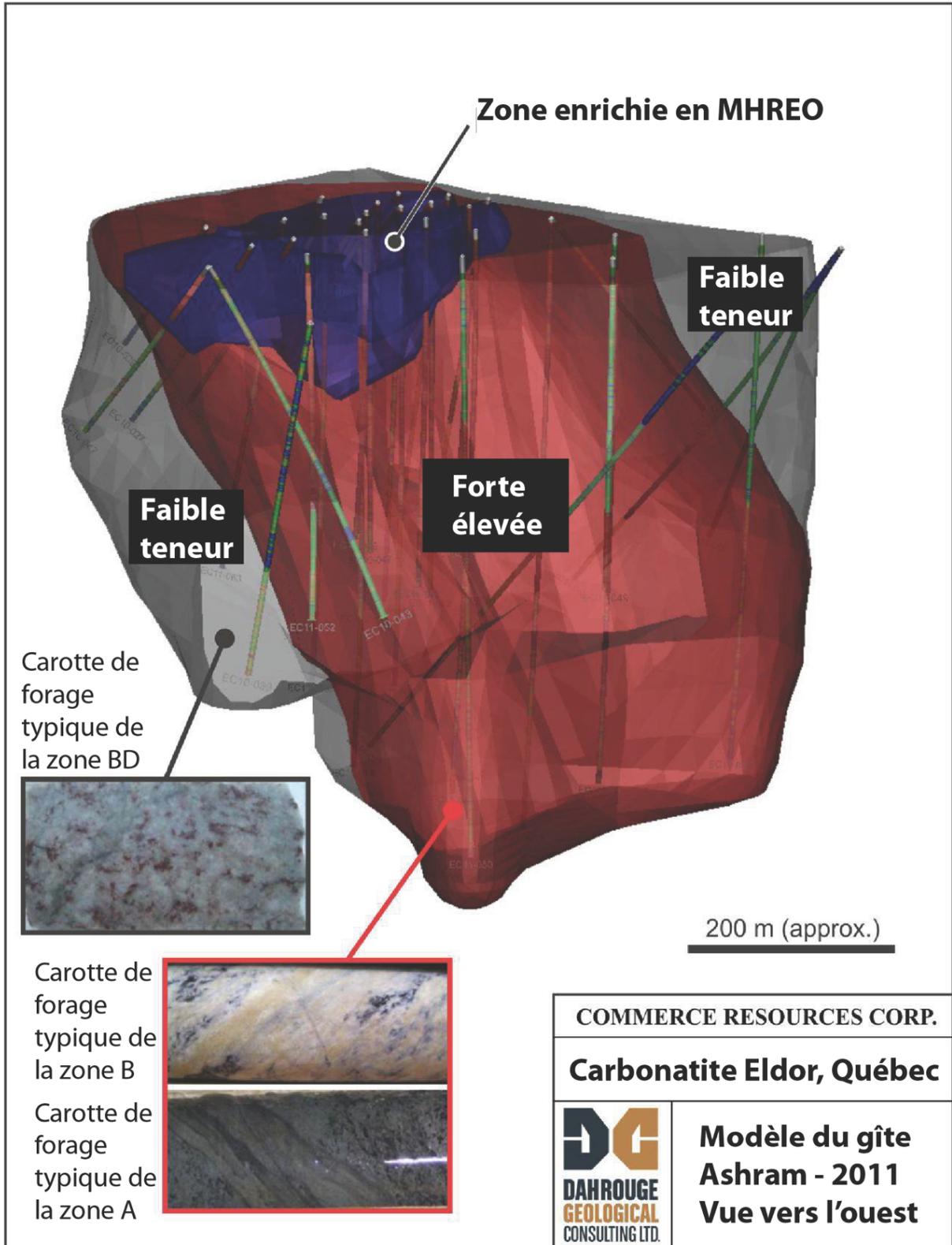


Figure 10: Modèle 3D des zones minéralisées du gîte Ashram (vue vers l'ouest) (d'après Gagnon et al., 2015)

1.2 Objectifs du projet

L'objectif général du projet de recherche est de développer un modèle génétique expliquant la mise en place des minéralisations en terres rares dans le gîte Ashram et de mettre en lien ce modèle avec la formation du complexe de carbonatite d'Eldor. Le projet tentera de répondre à plusieurs questions spécifiques, qui sont:

- Déterminer pourquoi la minéralisation est associée à la carbonatite dolomitique et à la ferro-carbonatite
- Identifier les processus impliqués dans la formation de la minéralisation économique en ETR dans le gîte Ashram. Il existe de nombreuses études descriptives sur les carbonatites riches en ETR, mais les mécanismes responsables de l'enrichissement de ces systèmes en éléments des terres rares sont encore mal compris. Ces processus comprennent la fusion partielle du manteau, l'évolution des magmas hyperalcalins par cristallisation fractionnée ou par exsolution de liquides carbonatés immiscibles et la remobilisation hydrothermale. Déterminer le rôle de ces processus dans la mise en place de la minéralisation dans le complexe de carbonatite d'Eldor
- Caractériser les relations spatiales et génétiques entre la zone MHREO (enrichie en terres rares intermédiaires et lourdes) et la zone A (enrichie en terres rares légères) (Figure 10)

1.3 Travaux réalisés

Cette section décrit les travaux qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016.

Travaux de terrain:

Les travaux de terrain qui ont eu lieu au printemps et à l'été 2015 ont permis d'effectuer la description de carottes de forage et d'affleurements naturels. Un total de 413 échantillons ont été collectés dans les différents faciès du complexe de carbonatite d'Eldor, en insistant particulièrement sur le faciès minéralisé en éléments des terres rares de « type Ashram ».

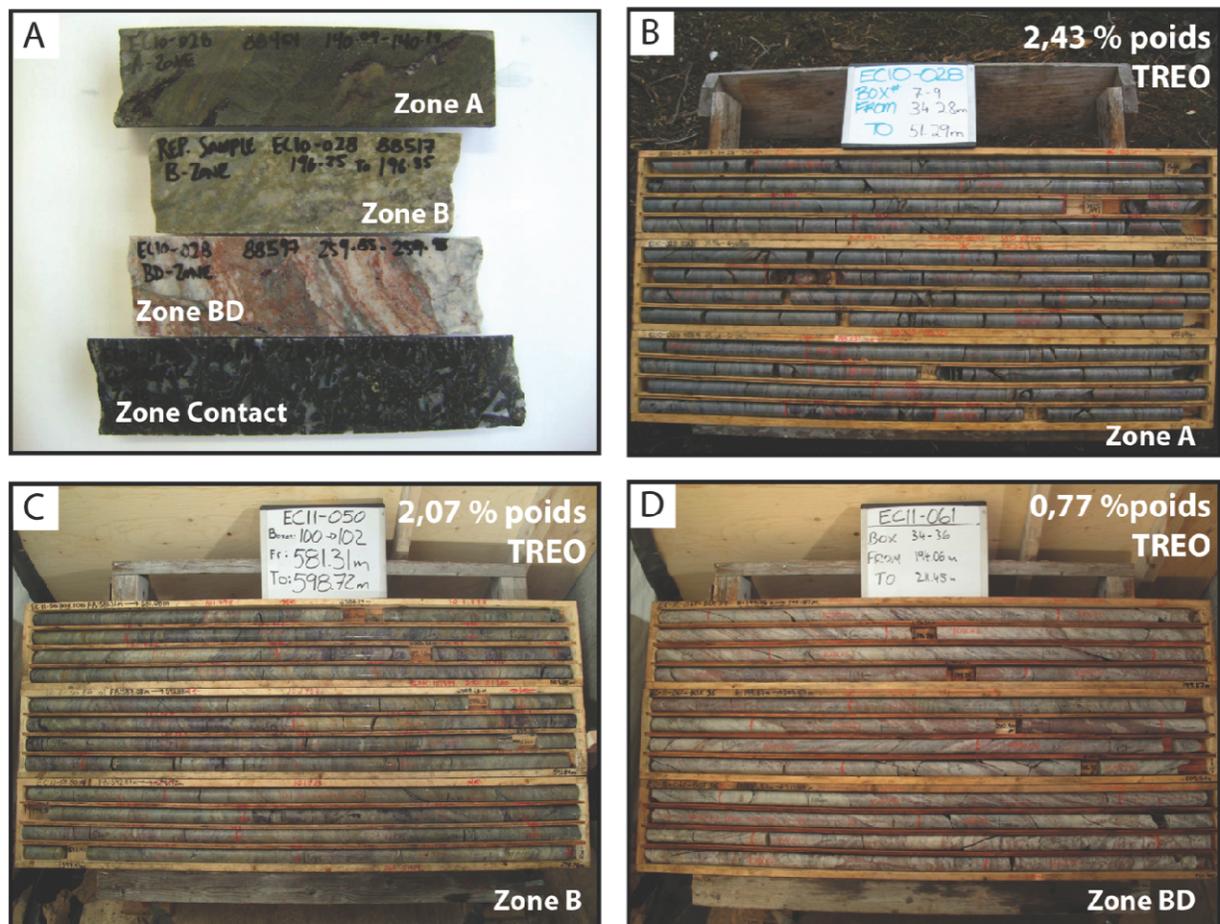


Figure 11: Principales zones minéralisées du gîte Ashram. A) Carottes de forage du trou EC10-028 qui montrent l'aspect des différentes zones minéralisées (Zone A, B, BD et Contact). Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources (Gagnon et al., 2015), B) Carottes de forage typiques de la zone A. La zone A représente la minéralisation la plus typique du gîte Ashram. Les unités dans cette zone sont des magnésio- et des ferro-carbonatites riches en ferrodolomite de couleur gris-vertâtre pâle à foncé et contenant des fragments de sidérite magnésienne, de fluorite et, localement, de monazite (Gagnon et al., 2015). La minéralisation (2,43% TREO) est très finement disséminée dans la monazite et la fluorite. Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources, C) Carottes de forage typiques de la zone B. La minéralisation (2,07% TREO) est très finement grenue et se retrouve dans la monazite. Dans cette section de forage, la monazite est très abondante et donne une teinte jaunâtre à la roche (Gagnon et al., 2015). Diamètre des carottes: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources, D) Carottes de forage typiques de la zone BD. La minéralisation en rose se trouve dans les fluorocarbonates (bastnäsite, synchysite et parisite). En général, la zone BD est moins minéralisée que les zones A et B, mais elle contient une plus grande variété de carbonates riches en ETR et en F (Gagnon et al., 2015). Diamètre de la carotte: 4,7 cm. Photographie: Commerce Resources.

Étude pétrographique:

Vingt-cinq lames minces ont fait l'objet d'une étude pétrographique détaillée. Sur ces 25 échantillons, 13 lames minces (CV15002, CV15004, CV15020, CV15024, CV15026, CV15113, CV15114, CV15115, CV15116, CV15123, CV15125, CV15127, CV15141) ont été analysées au microscope électronique à balayage (MEB) pour la caractérisation minérale et 22 lames minces (CV15001, CV15002, CV15004, CV15013, CV15014, CV15018, CV15020, CV15049, CV15085, CV15086, CV15096, CV15105, CV15108, CV15109, CV15113, CV15114, CV15115, CV15116, CV15123, CV15125, CV15127, CV15129, CV15141) ont été observées en cathodoluminescence.

Chimie minérale:

Trois cent vingt monazites se trouvant dans les faciès minéralisés des zones A et B et deux cent fluorocarbonates de terres rares de la zone BD du complexe de carbonatite d'Eldor ont été analysées pour les éléments majeurs et traces.

Lithogéochimie:

Plus de 17000 analyses d'éléments majeurs et traces réalisées sur roches totales par Commerce Resources sont disponibles dans le cadre de ce projet.

Géochimie isotopique:

Soixante-cinq analyses isotopiques de C et d'O ont été effectuées par spectrométrie de masse à rapport isotopique (IR-MS) sur minéraux carbonatés. Les échantillons nécessaires aux analyses isotopiques ont été sélectionnés dans les différents lithofaciès de l'intrusion, incluant les zones minéralisées en éléments des terres rares.

1.4 Liste des publications et communications

Aucune publication jusqu'à maintenant

2. Projet: Lac à Paul

2.1 Présentation du projet

Titre du projet: Caractérisation des terres rares dans les apatites du gisement P-Ti du Lac à Paul, dans l'anorthosite du Saguenay-Lac-Saint-Jean

Par: *William Chartier-Montreuil*, étudiant à la maîtrise, Université d'Ottawa (Figure 12)

Superviseurs: *Sarah Dare*, Université d'Ottawa / Université du Québec à Chicoutimi, *Sarah-Janes Barnes*, Université du Québec à Chicoutimi et *Ross Stevenson*, Université du Québec à Montréal (Figure 12)

Début du projet: Septembre 2014



Figure 12: En haut: William Chartier-Montreuil, étudiant à la maîtrise, Université d'Ottawa (à gauche), Sarah Dare (à droite). En bas: Sarah-Janes Barnes (à gauche) et Ross Stevenson (à droite)

La propriété du Lac à Paul est située dans la région du Lac Saint-Jean (Québec), à environ 190 km au nord de l'arrondissement La Baie de la ville Saguenay. Le gisement de P-Ti du Lac à Paul se situe dans la partie nord de la Suite anorthositique du Lac-Saint-Jean (SALSJ) (Figure 13), dans la ceinture de l'Allochtonne polycyclique de la Province de Grenville (Rivers et al., 1989). Il contient des ressources mesurées et indiquées de 702,7 Mt à une teneur de 7,16% P₂O₅ et des ressources présumées de 26 Mt à une teneur de 6,58 % P₂O₅ (Arianne Phosphate Inc., 2015). Les gîtes magmatiques associés à des roches mafiques à ultramafiques ne sont pas reconnus pour leur potentiel en ETR, cela malgré la présence en quantité appréciable de ces métaux dans les apatites. En effet, l'apatite [Ca₁₀(PO₄)₆(OH, F, Cl)₂], en plus de contenir du P, est enrichie en terres rares légères (jusqu'à 1% poids) par rapport aux terres rares lourdes (Belousova et al., 2002). Dans la conjoncture politique et économique actuelle, l'intérêt pour ces minéraux et leurs contenus en ETR est devenu croissant. Le gisement du Lac à Paul et ses zones riches en apatite constitue donc un site d'étude privilégié pour étudier les éléments des terres rares dans ce type de minéral et de gîte.

Le gisement du Lac à Paul est stratiforme (Arianne Phosphate Inc., 2015) et orienté est-ouest. Il est encaissé entre une unité de gabbronorite, norite et pyroxénite au nord et une unité de leuconorite,

leucotroctolite et anorthosite au sud. Les zones de hautes teneurs en apatite se trouvent principalement dans l'unité de péridotite nelsonitique, dans l'unité de norite nelsonitique et dans la zone de mélange entre ces deux unités (Arianne Phosphate Inc., 2015; Figures 14 et 15). L'épaisseur de la zone Paul, la plus importante de ces zones minéralisées, varie de 150 à 300 mètres et son extension en profondeur atteint 1000 mètres (Arianne Phosphate Inc., 2015; Figure 14)

2.2 Objectifs du projet

Le projet de caractérisation des terres rares dans les apatites du gisement du Lac à Paul a pour objectif principal d'améliorer la compréhension de la formation des gisements de type P-Ti et de déterminer la distribution des terres rares au niveau du gisement.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants:

- Démontrer que l'apatite est bel et bien le minéral hôte des ETR
- Déterminer si la distribution des ETR dans le gisement est homogène. Si celle-ci est hétérogène, déterminer les facteurs qui influencent leur distribution
- Déterminer la composition en ETR du magma parent des unités minéralisées en utilisant la composition de l'apatite
- Identifier le lien génétique potentiel entre les unités minéralisées et les ferro-diorites régionales

2.3 Travaux réalisés

Cette section décrit les travaux qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016.

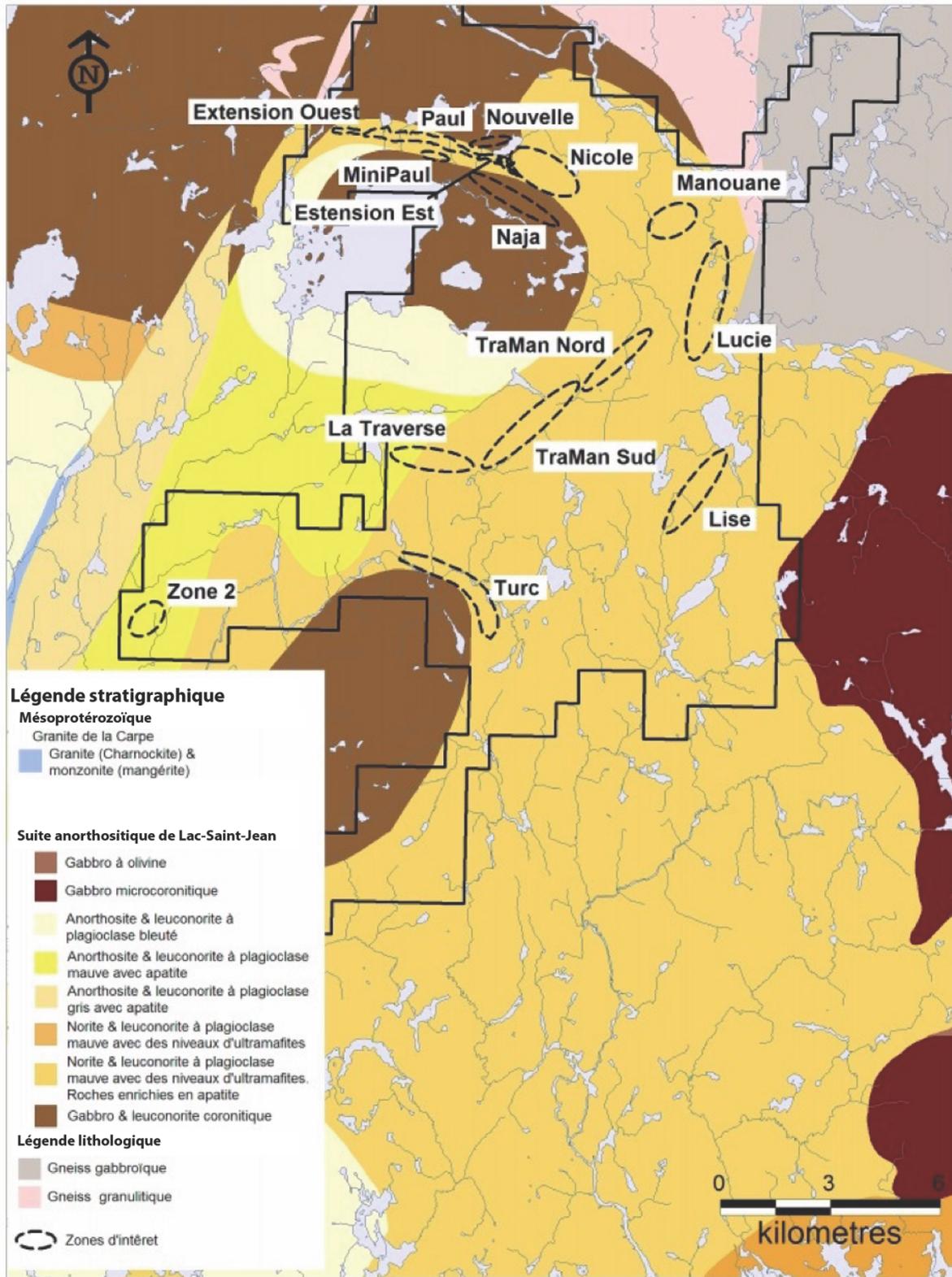


Figure 13: Carte de la géologie régionale du secteur du Lac-à-Paul. Les lignes noires marquent le contour de la propriété et les noms sur la carte représentent les indices minéralisés (d'après Cimon et Hébert, 1998)

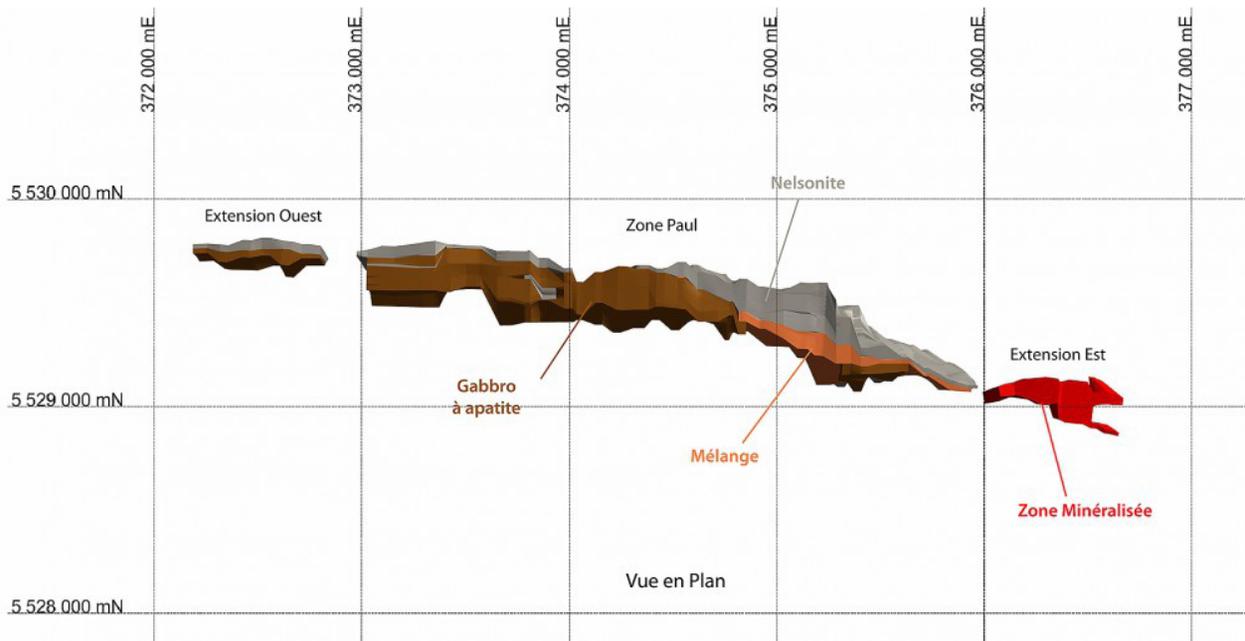


Figure 14: Enveloppes minéralisées du gisement du Lac à Paul (d'après Arianne Phosphate Inc., 2015)

Travaux de terrain:

Les travaux sur le terrain se sont déroulés lors de 2 visites. Une première a eu lieu du 10 au 15 août 2014 et la seconde visite a eu lieu le 22 juillet 2015. Un stage MITACS de familiarisation avec l'environnement du projet dans les bureaux d'Arianne Phosphate à Chicoutimi a eu lieu lors de l'été 2015. Au total, 74 échantillons ont été récoltés incluant, 35 échantillons d'affleurements et 27 échantillons de carottes de forage provenant des différentes unités minéralisées du gisement, 8 échantillons de ferro-diorite située à proximité du gisement et 4 échantillons de roches stériles affleurant au sud du gisement.

Étude pétrographique:

Un total de 52 lames minces ont été observées et décrites au microscope.

Chimie minérale:

La composition en éléments traces de 46 minéraux incluant l'apatite, l'olivine, le plagioclase et les pyroxènes présents dans les principaux lithofaciès a été déterminé par spectrométrie de masse à

plasma induit couplée à l'ablation laser (LA-ICP-MS). Des travaux d'analyses de ces mêmes minéraux à la microsonde électronique sont en cours de planification.

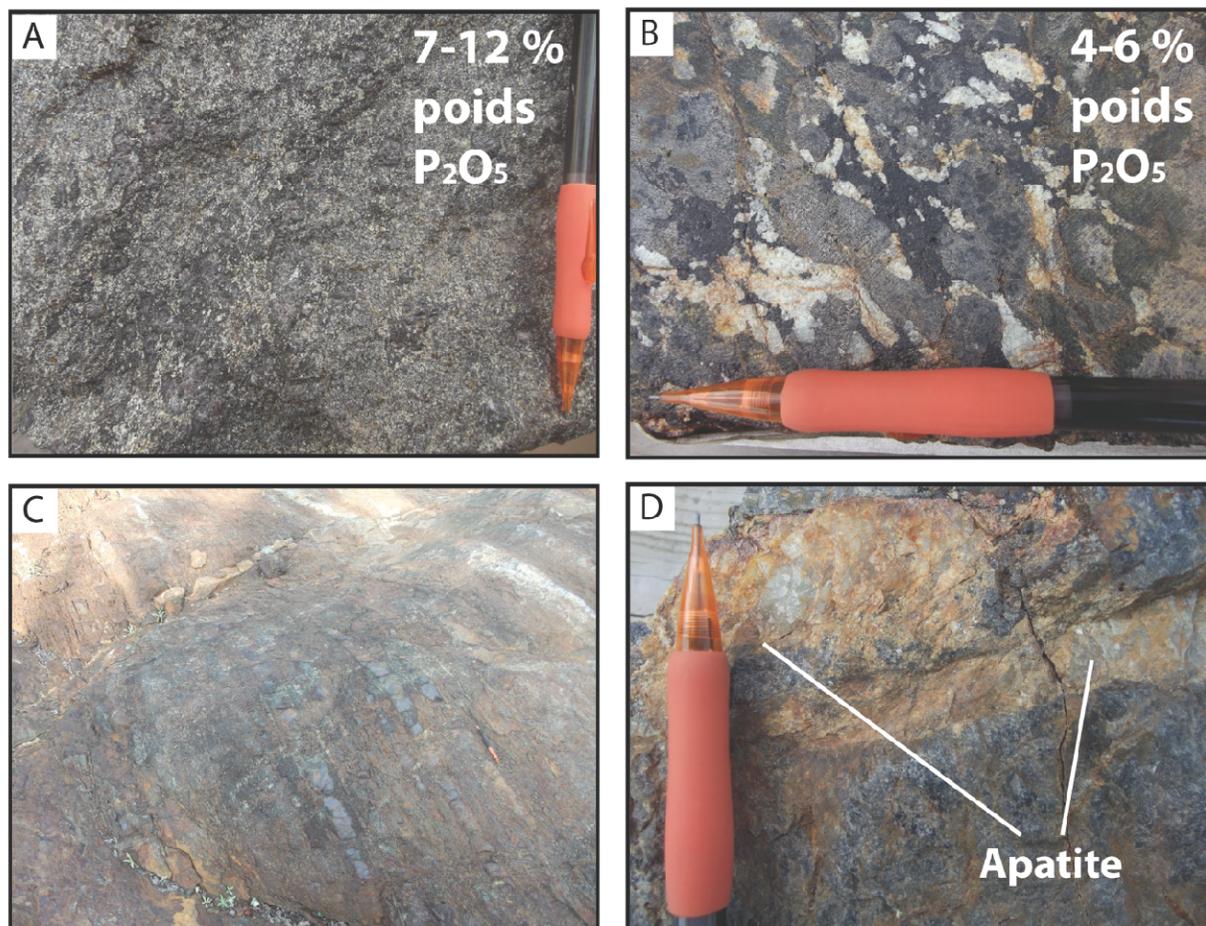


Figure 15: Principaux lithofaciés du gisement du Lac à Paul. A) Péridotite nelsonitique massive, B) Gabbro-norite nelsonitique, C) Zone de mélange, D) Apatite grossière. Pointe du crayon: 1,2 cm. Photographies: William Chartier-Montreuil.

Lithogéochimie:

Les analyses lithogéochimiques (éléments majeurs et traces) ont porté sur 27 échantillons dont 14 échantillons d'unités minéralisées, 5 échantillons de ferro-diorite, 4 échantillons de stérile prélevés au sud et à l'est du gisement et 4 concentrés d'apatite empruntés à Ariane Phosphate.

Géochimie isotopique:

Un total de 9 analyses isotopiques Sm-Nd et Rb-Sr ont été réalisées par dilution isotopique et spectrométrie de masse à thermo-ionisation (ID-TIMS) sur des concentrés d'apatite provenant des trois zones minéralisées identifiées. Actuellement, 9 autres échantillons provenant des trois zones minéralisées sont en cours de préparation pour des datations Sm-Nd et Rb-Sr sur roche totale à l'aide de la même méthode.

2.4 Liste des publications et communications

Affiches

Chartier-Montreuil, W., Dare, S., Barnes, S.-J., Stevenson, R., 2016. Characterisation of the Rare Earth Elements in Apatite of the Lac À Paul P-Ti Deposit, Saguenay-Lac-St-Jean, Québec. Congrès PDAC 2016, Toronto, Ontario (*en préparation*).

Chartier-Montreuil, W., Dare, S., Barnes, S.-J., Stevenson, R., 2015. Caractérisation des terres rares dans les apatites du gisement de P-Ti du Lac à Paul, dans l'anorthosite du Saguenay-Lac-St-Jean. Québec Mines 2015, Québec, Québec.

Chartier-Montreuil, W., Dare, S., Barnes, S.-J., Stevenson, R., 2014. Caractérisation des terres rares dans les apatites du gisement de P-Ti du Lac à Paul, dans l'anorthosite du Saguenay-Lac-St-Jean. Québec Mines 2014, Québec, Québec.

Présentations orales

Chartier-Montreuil, W., Dare, S., Barnes, S.-J., Stevenson, R., 2015. Characterisation of the Rare Earth Elements in Apatite of the Lac-À-Paul P-Ti Deposit, in the Saguenay-Lac-St-Jean. Séminaires gradués Centre géoscientifique d'Ottawa-Carleton (OCGC) (Édition de mai), Université Carleton, Ottawa, Ontario.

3. Projet: Kipawa

3.1 Présentation du projet

Titre du projet: Métallogénie des terres rares du gisement de Kipawa, Québec

Par: *Frédéric Fleury*, étudiant à la maîtrise, Université Laval (Figure 16)

Superviseur: *Marc Constantin*, Université Laval et *Ross Stevenson*, Université du Québec à Montréal (Figure 16)

Début du projet: Septembre 2014



Figure 16: En haut: Frédéric Fleury, étudiant à la maîtrise, Université Laval (à gauche), Marc Constantin (à droite). En bas: Ross Stevenson

Le gîte de Kipawa (propriété Zeus) se situe à 60 km au nord-est de la ville de Témiscamingue et 140 km au sud de Rouyn-Noranda, au Québec (Figure 17). Il est localisé dans la ceinture parautochtone de la Province de Grenville, à 55 km au sud du contact avec la Province archéenne du Supérieur. Ce gîte est actuellement en cours de développement par Matamec Explorations et contient des réserves estimées de 19,8 Mt à 0,41 % TREO et un enrichissement de 33% en terres rares lourdes (Tb_2O_3 à Lu_2O_3 plus Y_2O_3) par rapport aux terres rares légères (Saucier et al., 2013).

Le gîte de Kipawa est encaissé dans le complexe alcalin intrusif de Kipawa mis en place à 1033 Ma (Breemen et Currie, 2004). Ce complexe intrusif, peu déformé, se situe sur le flanc ouest de l'antiforme Sairs Lake qui est associé à la déformation régionale principale (D_2) (Saucier et al., 2013; Figure 17). Au niveau du gîte, le complexe pend vers le sud-ouest à 20-30° et comprend deux unités lithologiques principales, soit un granite gneissique peralcalin recouvrant une syénite gneissique contenant localement des lits de roches calco-silicatées. La syénite gneissique est la lithologie hôte de la minéralisation en ETR (Saucier et al., 2013). Elle comprend cinq sous-types, incluant la syénite leucocrate, la syénite mésocrate, la syénite mafique, la syénite gneissique et l'amphibolite gris-argenté (Saucier et al., 2013). Les contacts entre ces différents lithofaciès sont généralement graduels (Saucier et al., 2013).

Dans le cas du gîte de Kipawa, trois minéraux sont considérés comme des sources économiques de terres rares, soit l'eudialyte, la mosandrite et la britholite (Saucier et al., 2013; Figure 18). L'apatite-(P) est aussi présente et contribue à une partie mineure des terres rares légères (Saucier et al., 2013). Le gîte de Kipawa comprend trois zones minéralisées qui sont subparallèles et ont été nommées en fonction du minéral prédominant dans l'assemblage minéralogique. Chaque zone couvre en surface une superficie de 1,45 km de long (du NO au SE) et 200 m de large (de NE au SO) (Saucier et al., 2013; Figure 19). Le gîte de Kipawa, comme la plupart des minéralisations associées aux roches ignées peralcalines, est enrichi en terres rares lourdes (Saucier et al., 2013).

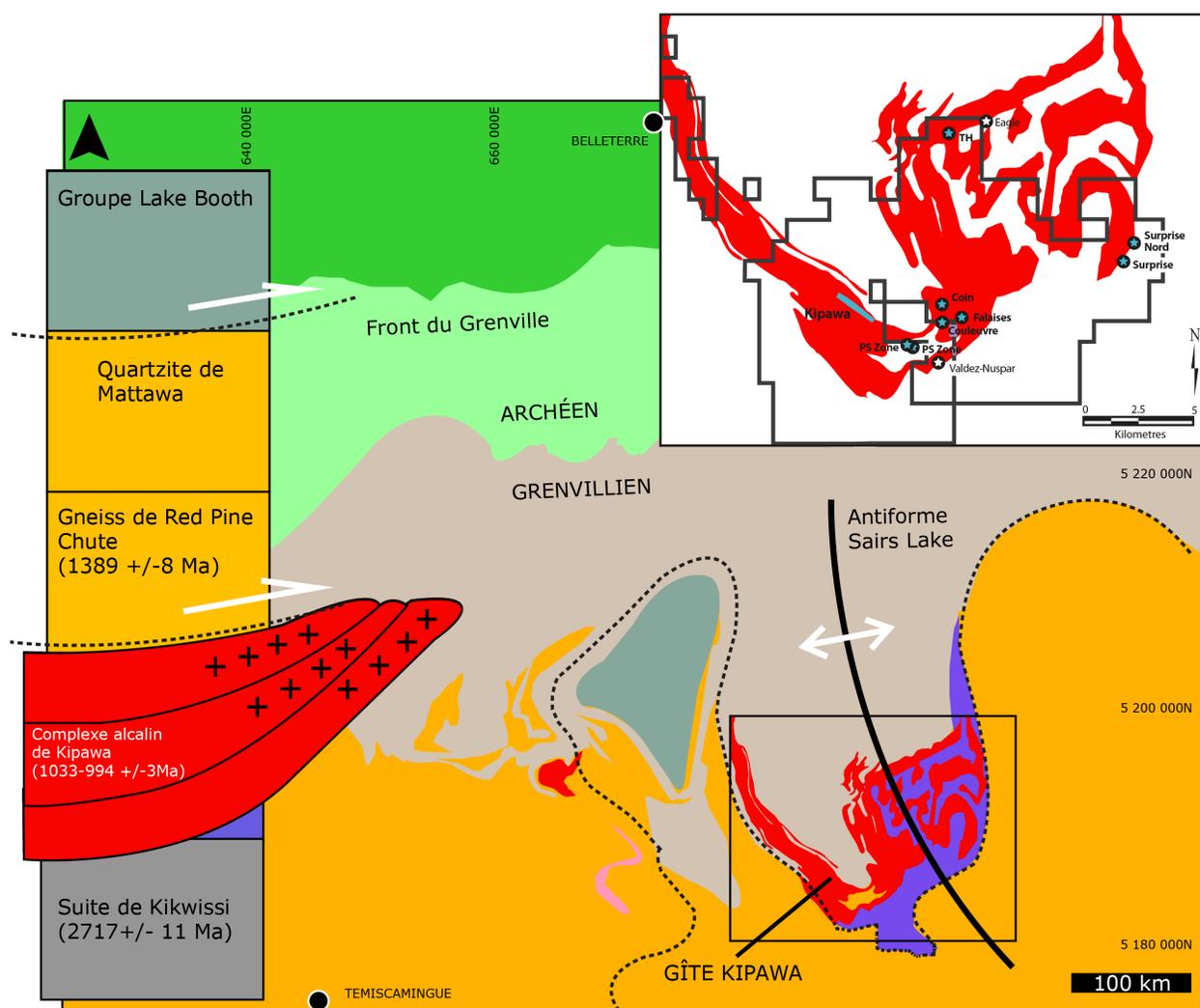


Figure 17: Carte géologique régionale du gîte de Kipawa et colonne stratigraphique (d'après Saucier et al., 2013). Les datations U-Pb sur zircons sont tirées de Currie et Breeman (1996) et Breeman et Currie (2004).

3.2 Objectifs du projet

Ce projet de recherche a pour objectif principal de comprendre l'origine de la minéralisation en ETR dans les gîtes associés aux complexes syénitiques en utilisant le complexe de Kipawa comme exemple.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants:

- Identifier la signature minéralogique et géochimique du gisement de Kipawa
- Déterminer l'origine des éléments des terres rares
- Positionner le gîte de Kipawa par rapport aux autres complexes syénitiques minéralisés en terres rares

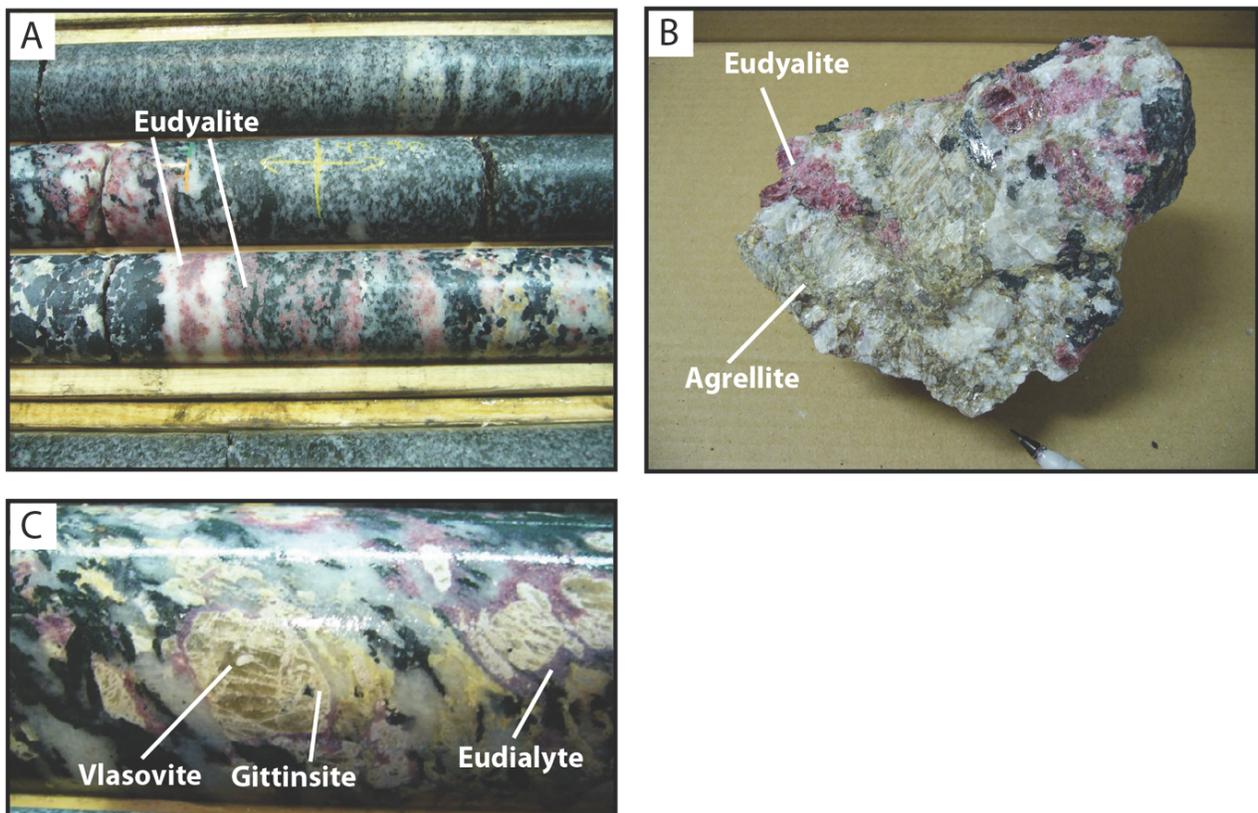


Figure 18: Exemples de minéraux contenant des ETR au gîte de Kipawa. A) Carottes de forage montrant plusieurs grains d'eudialyte en rose. Diamètre de la carotte: 4,7 cm, B) Échantillon de syénite pegmatitique contenant de l'eudialyte et de l'agrellite. Pointe du crayon: 1cm, C) Vlasovite, gittinsite et eudialyte. Largeur de la photographie: 4 cm. Photographies: Frédéric Fleury.

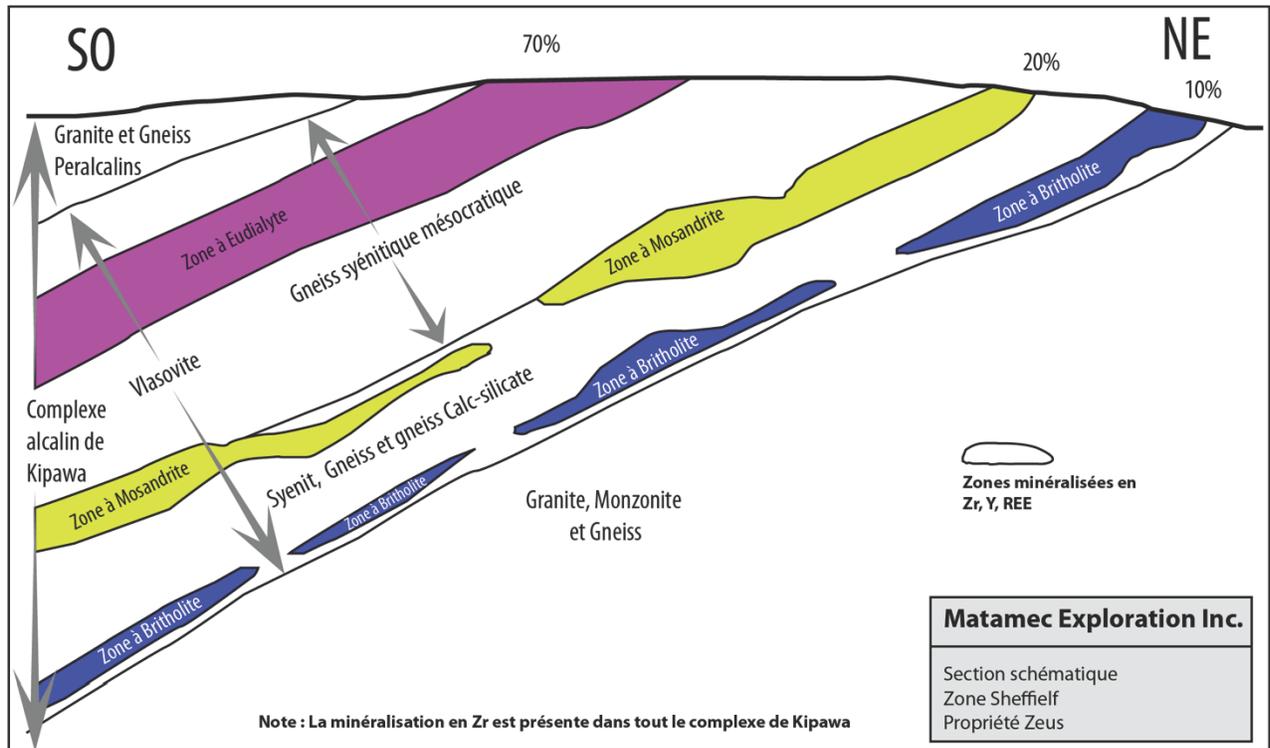


Figure 19: Zones minéralisées du gîte de Kipawa (d'après Saucier et al., 2013)

3.3 Travaux réalisés

Cette section décrit les travaux qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016.

Étude minéralogique:

Trois analyses par spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) et par diffractométrie de rayons X (DRX) ont été effectuées sur la mosandrite afin de caractériser un des principaux minéraux porteurs de terres rares au gîte de Kipawa.

Lithogéochimie:

Près de 1800 analyses lithogéochimiques d'éléments majeurs et d'éléments traces réalisées par Matamec Explorations sont utilisées dans le cadre de ce projet.

Géochimie isotopique:

Un total de 9 analyses isotopiques Sm-Nd ont été effectuées par ID-TIMS sur différents échantillons représentatifs des principales lithologies du secteur d'étude, incluant 1 concentré de pyroxènes, 1 concentré d'amphiboles et 7 échantillons de roches totales.

3.4 Liste des publications et communications

Présentations orales

Fleury, F., Constantin, M., Stevenson, R., 2015. Le complexe de Kipawa: terres rares, syénites et minéraux agpaitiques. Journée des sciences de la Terre, Université Laval, Québec, Québec.

Fleury, F., Constantin, M., Stevenson, R., 2016. Les isotopes de Sm-Nd au gisement de terres rares de Kipawa. Atelier de la Chaire de recherche industrielle CRSNG-Agnico Eagle en exploration minérale, Université Laval, Québec, Québec.

Projets intégrateurs

4. Projet: Étude pétrophysique/géophysique des gîtes de terres rares au Québec

4.1 Présentation du projet

Titre du projet: Étude pétrophysique et géophysique des gîtes de terres rares au Québec

Par: *Pengzhi Zhao*, étudiant au doctorat, École Polytechnique de Montréal (Figure 20)

Superviseurs: *Michel Chouteau*, École Polytechnique de Montréal, *Christian Dupuis*, Université Laval et *Li Zhen Cheng*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Figure 20)

Début du projet: Mai 2015



Figure 20: En haut: Pengzhi Zhao, étudiant au doctorat, École polytechnique de Montréal (à gauche), Michel Chouteau (à droite), En bas: Christian Dupuis (à gauche) et Li Zhen Cheng (à droite)

4.2 Objectifs du projet

La géophysique en exploration minière est une stratégie rentable et efficace qui permet de détecter et de délimiter des environnements favorables à différents types de gîtes. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, aucune signature type adéquate pour les gîtes de terres rares n'a été définie. Ceci peut être causé par la complexité de la minéralogie des roches encaissantes et des minéralisations en terres rares, par la grande diversité des types et des environnements de gîtes d'ETR, ou tout simplement dû à des limitations technologiques en raison par exemple des faibles teneurs en métaux.

Ce projet de recherche a trois principaux objectifs:

- Déterminer les propriétés physiques de la minéralisation et des roches hôtes des ETR au Québec
- Construire des modèles pour les gîtes d'ETR dans la perspective de proposer des stratégies d'exploration

- Développer des outils informatiques qui serviront à traiter et interpréter les données géophysiques des gisements de terres rares. Une technologie d'interprétation sera élaborée et permettra d'intégrer les diverses données géoscientifiques (e.g. géologie, géophysique, minéralogie)

4.3 Travaux réalisés

Cette section décrit les travaux qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016. Dans le cadre de ce doctorat, trois gîtes de terres rares ont été sélectionnées comme secteur d'étude, soit Ashram, Kipawa et Lac à Paul.

Mesure des propriétés physiques:

La première partie de ce projet de doctorat a compris la mesure des propriétés physiques (densité, porosité et susceptibilité magnétique) des échantillons de carottes de forage provenant des gîtes Eldor, Lac à Paul et quelques échantillons de Kipawa. À l'été 2015, Pengzhi Zhao a mesuré les propriétés physiques des échantillons de la propriété Eldor (gîte Ashram) et Christian Dupuis (Université Laval) et son élève stagiaire, Mylia Arseneault-Monette, ont mesuré celles des échantillons provenant des gîtes du Lac à Paul et de Kipawa. Au total, les propriétés physiques de 169 échantillons de roches hôtes de la minéralisation en ETR ont été déterminées.

Acquisition des données pétrophysiques et géophysiques:

L'acquisition des données pétrophysiques et géophysiques dans le cadre de ce projet a été réalisée via des levés magnétiques et spectrométriques aéroportés.

Réalisation de modèle:

La réalisation de plusieurs modèles est en cours, dont un modèle spectrométrique en 2D et un modèle 3D de susceptibilité magnétique du gîte Ashram obtenu suite à l'inversion des données magnétiques aéroportées.

4.4 Liste des publications et communications

Aucune publication jusqu'à maintenant

Projet: Signature isotopique des gîtes d'éléments des terres rares au Québec

5.1 Présentation du projet

Titre du projet: Signature isotopique en Sm-Nd des principaux gîtes d'éléments des terres rares au Québec

Par: *Anne-Aurélie Sappin*, chercheur post-doctoral, Université Laval (Figure 21)

Superviseur: *Georges Beaudoin*, Université Laval (Figure 21)

Début du projet: Avril 2015



Figure 21: Anne-Aurélie Sappin, chercheure postdoctorale, Université Laval (à gauche) et Georges Beaudoin (à droite)

5.2 Objectifs du projet

L'objectif principal du projet est de caractériser la signature isotopique en Sm-Nd des principaux gîtes d'éléments des terres rares au Québec.

Ce projet de recherche a trois principaux objectifs:

- Déterminer la ou les source(s) mantellique(s) qui sont impliquée(s) dans la genèse de ces gîtes
- Identifier et caractériser la contribution crustale dans la genèse de ces gîtes
- Identifier les secteurs les plus favorables pour l'exploration des ETR au Québec

5.3 Travaux réalisés

Cette section décrit les travaux qui ont été réalisés depuis le début du projet jusqu'au 1^{er} mars 2016.

Collecte d'échantillons:

La première étape du projet a consisté à sélectionner des échantillons de roches hôtes provenant des différents types de gîte d'ETR au Québec. Le tableau 1 présente la liste des échantillons collectés qui seront analysés prochainement.

Tableau 1: Liste des échantillons de roches hôtes des gîtes d'ETR collectés pour analyse isotopique

Type de gîte	Nom du gîte	Type d'échantillon	Nombre et description des échantillons
Gîte associé aux complexes de carbonatite	Niobec	Carottes de forage	<ul style="list-style-type: none"> • 5 échantillons de carbonatite (Figure 22A) • 1 échantillon de syénite
	Lac Shortt	Échantillons de la mine souterraine	<ul style="list-style-type: none"> • 2 échantillons de carbonatite • 1 échantillon de lamprophyre • 1 échantillon de syénite • 1 échantillon de diorite • 1 échantillon de roche à albite-dolomite échantillonné dans une zone de fracture • 1 échantillon de minerai à basse teneur • 1 échantillon de minerai à haute teneur
	Crevier	Carottes de forage	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillons de syénite (en attente) • Échantillons de carbonatite (en attente)
Gîte associé aux roches ignées peralcalines	Misery Lake	Carottes de forage	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillons de syénite (en attente)
Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au-ETR	Kwyjibo	Carottes de forage, excepté pour l'échantillon de la zone minéralisée Andradite qui provient d'un affleurement	<ul style="list-style-type: none"> • 6 échantillons de la zone minéralisée Josette (Figure 22B) • 1 échantillon de la zone minéralisée Fluorine • 1 échantillon de la zone minéralisée Andradite • 2 échantillons de granite • 2 échantillons de gabbro • 1 échantillon de pegmatite
Indice associé aux pegmatites peralumineuses	Pegmatites du lac Okaopéo	Affleurements	<ul style="list-style-type: none"> • 4 échantillons de pegmatite

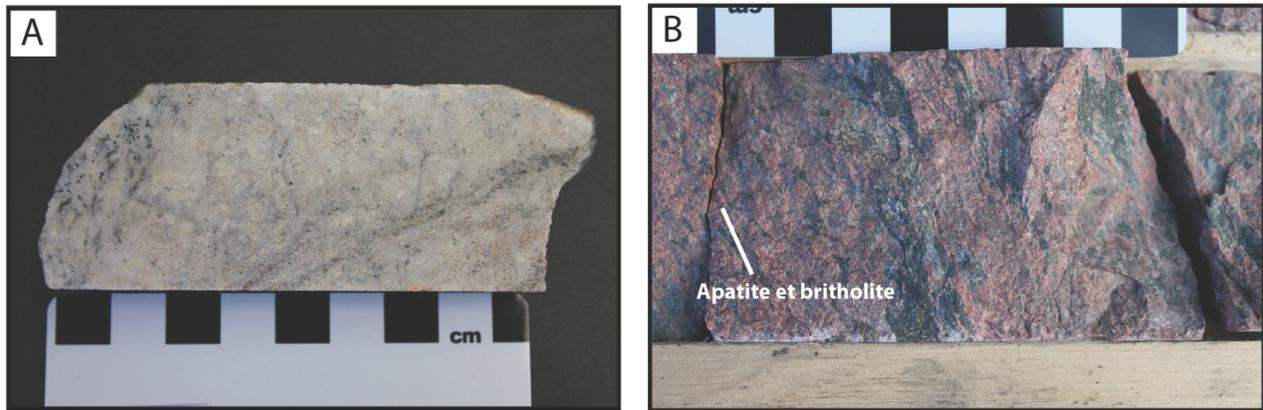


Figure 22: Carbonatite dolomitique du complexe de carbonatite de Saint-Honoré, mine Niobec (Québec), B) Veines/veinules d'apatite et britholite recoupant un gneiss à biotite, hornblende, plagioclase et magnétite dans l'horizon Josette, propriété Kwyjibo (Québec). Photographies: Anne-Aurélié Sappin.

Préparation des échantillons pour analyses isotopiques:

Les différents échantillons sont en cours de préparation pour effectuer des analyses isotopiques Sm-Nd par ID-TIMS sur concentrés minéraux. La préparation comprend la séparation des minéraux primaires ayant préservé leur signature isotopique radiogénique magmatique (e.g., calcite, feldspaths alcalins) et/ou des minéraux porteurs de la minéralisation en ETR (e.g., allanite, apatite). Présentement, seuls les minéraux des pegmatites du lac Okaopéo ont été séparés. Pour chaque échantillon de pegmatite, il y a eu séparation des allanites ou des monazites et des feldspaths alcalins ou des plagioclases.

5.4 Liste des publications et communications

Publications avec comité de lecture

Sappin, A.-A., Beaudoin, G., 2015. Rare earth elements in Québec, Canada: Main deposit types and their economic potential. Dans: Simandl, G.J., Neetz, M. (Eds), Symposium on strategic and critical materials proceedings, November 13-14, 2015, Victoria. British Columbia Geological Survey, Paper 2015-3, p. 265-273.

Publications sans comité de lecture

Sappin, A.-A., Beaudoin, G., 2015. Classification des principaux indices en éléments des terres rares au Québec (Canada): Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec, MB 2015-10, 76 pp.

Présentations orales

Sappin, A.-A., Beaudoin, G., 2015. Rare earth elements in Québec (Canada): Main deposit types and their economic potential. Symposium on strategic and critical materials, Victoria, British Columbia.

Sappin, A.-A., Beaudoin, G., 2015. Les minéralisations en éléments des terres rares au Québec (Canada): Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique. 13e Forum Technologique du CONSOREM-DIVEX, Rouyn-Noranda, Québec.

Conclusion

Le projet terres rares de DIVEX réalisé en collaboration avec le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) a débuté en 2013 suite à une subvention accordée par le MERN de 100 000\$/année pour 3 ans et grâce au support financier de l'organisme Mitacs et des nombreux partenaires industriels impliqués dans le projet (Commerce Resources, Ariane Phosphate, Matamec Explorations et Abitibi Géophysique). Il se divise en 5 sous-projets incluant 3 études de cas (Ashram, Lac à Paul et Kipawa) et 2 projets intégrateurs (signature pétrophysique et géophysique et signature isotopique en Sm-Nd des gîtes de terres rares au Québec; Tableau 2). L'équipe de recherche est composée de 14 membres de DIVEX, dont 5 membres étudiants (Anne-Aurélié Sappin, chercheure post-doctorale à l'Université Laval, Caitlin Beland, étudiante au doctorat à l'Université McGill, Pengzhi Zhao, étudiant au doctorat à l'École Polytechnique de Montréal, William Chartier-Montreuil, étudiant à la maîtrise à l'Université d'Ottawa et Frédéric Fleury, étudiant à la maîtrise à l'Université Laval), 8 membres réguliers (Georges Beaudoin, Marc Constantin et Christian Dupuis, Université Laval, Anthony E. William Jones, Université McGill, Sarah-Janes Barnes, Université du Québec à Chicoutimi, Ross Stevenson, Université du Québec à Montréal et Michel Chouteau, École Polytechnique de Montréal) et 1 membre associé (Sarah Dare, Université d'Ottawa). Les différents sous-projets ont débuté entre septembre 2014 et mai 2015 et sont donc rendus à des stades d'avancement différents. Le travail de terrain, la collecte d'échantillons et l'acquisition des données pétrophysiques et géophysiques sont pratiquement terminés pour tous les projets. Les études minéralogiques et géochimiques et les modélisations sont présentement en cours. À l'heure actuelle, le projet terres rares a permis de générer 1 publication avec comité de lecture, 1 publication sans comité de lecture, 5 présentations orales et 3 photo-présentations (affiches). Les résultats préliminaires des différents sous-projets feront l'objet du prochain rapport d'étape qui sera disponible en 2017.

Tableau 2: Tableau récapitulatif des équipes de recherche, des partenaires corporatifs et de la date de début de chaque sous-projet par ordre chronologique

Projet	Équipe de recherche	Partenaire corporatif	Date de début
Lac à Paul	William Chartier-Montreuil, étudiant à la maîtrise à l'Université d'Ottawa, Sarah Dare (superviseur), Sarah-Janes Barnes (co-superviseur) et Ross Stevenson (co-superviseur)	Arianne Phosphate	Septembre 2014
Kipawa	Frédéric Fleury, étudiant à la maîtrise à l'Université Laval, Marc Constantin (superviseur) et Ross Stevenson (co-superviseur)	Matamec Explorations	Septembre 2014
Ashram	Caitlin Beland, étudiante au doctorat à l'Université McGill et Anthony E. Williams-Jones (superviseur)	Commerce Resources	Janvier 2015
Signature isotopique des gîtes d'ETR au Québec	Anne-Aurélie Sappin, chercheur post-doctoral à l'Université Laval et Georges Beaudoin (superviseur)		Avril 2015
Étude pétrophysique/ géophysique des gîtes de terres rares au Québec	Pengzhi Zhao, étudiant au doctorat à l'École Polytechnique de Montréal, Michel Chouteau (superviseur) et Christian Dupuis (co-superviseur)	Abitibi Géophysique	Mai 2015

Références

- Arianne Phosphate Inc.**, 2015. Géologie. <<http://www.arianne-inc.com/fr/projetminier/geologie>> Accès 22 février, 2016.
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., & Fisher, N. I.**, 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, 76(1), 45-69.
- Boily, M., Gosselin, C.**, 2004. Les principaux types de minéralisations en métaux rares (Y,Zr-Nb-Ta-Be-Li-ETR) du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, ET 2004-01, 46 p.
- Breemen, O. V., et Currie, K. L.**, 2004. Geology and U Pb geochronology of the Kipawa Syenite Complex a thrust related alkaline pluton and adjacent rocks in the Grenville Province of western Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(4), 431-455.
- Cimon, j., Hébert, C.**, 1998. Modèle préliminaire sur l'origine de la mise en place et le potentiel économique des séquences différenciées associées à l'anorthosite du Lac-Saint-Jean. Ministère des Ressources naturelles du Québec, PRO-98-06.
- Clark, T. et Wares, R.**, 2006. Lithotectonic and Metallogenic Synthesis of the New Quebec Orogen (Labrador Trough), MM 2005- 01, Publication du M.E.R., 175 pages.
- Currie, K. L et Breemen, O. V.**, 1996. The origin of rare minerals in the Kipawa syenite complex, Western Quebec. *Canadian Mineralogist*, Vol. 34, pp.435451
- Demers, M. et Blanchet, C.**, 2002. Propriété Lac Erlandson- Ta reconnaissance géologique, août 2001, Mines d'Or Virginia, 101p.
- European commission**, 2010. Critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. 53 p. <<http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical>> Accès 22 février, 2015.
- Gagnon, G., Rousseau, G., Camut, Y., Gagné J.**, 2015. Technical report, preliminary economic assessment, Ashram Rare Earth Deposit For Commerce Resources Corp. 219p. <http://www.commerceresources.com/assets/docs/reports/2015-01-07_GG-PEA-Report.pdf> Accès 3 février 2016.
- Gambogi, J.**, 2015. Rare earths. In: Mineral commodity summaries 2015. U.S. Geological Survey, pp. 128-129.
- Gosselin, C., Boily, M., Beaumiwe, M., Leduc, M., Dion, D.J., Garceau, C., Thériault, R.**, 2003. Minéralisations en métaux rares (Y, Zr, Nb, Ta, Be, Li et ETR) au Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, DV 2003-03, 1 poster, 1 cd-rom.

Gittins, J. et Harmer, R.E., 1997. What is ferrocarbonatite? A revised classification. *Journal of African Earth Sciences*. 25: 159-168.

Institution spécialisée des Nations Unies pour les technologies de l'information et de la communication (TIC), 2014. <<http://www.itu.int/en/ITUD/Statistics/Pages/publications/manual2014.aspx> >Accès 3 février 2016.

Laferrrière, A., 2011. Technical report, mineral resource estimation, Eldor property–Ashram deposit, Nunavik, Quebec, Commerce Resources Corporation. NI 43-101 technical report, 82p. <http://www.commerceresources.com/assets/docs/nr/Eldor_NI43-101.pdf > Accès 8 février, 2016.

Ressources naturelles Canada, 2013. Éléments des terres rares – Dossier spécial. 18p. <<http://www.mcan.gc.ca/mines-materiaux/marches/annuaire-mineraux-canada/2011/11795>> Accès 3 février, 2016.

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

Sappin, A.-A. et Beaudoin, G., 2016. Rare earth elements in Québec, Canada: Main deposit types and their economic potential. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 265-273.

Sappin, A.-A. et Beaudoin, G., 2015. Classification des principaux indices en éléments des terres rares au Québec (Canada): Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique. Ministère des Ressources naturelles, Québec, MB 2015-10, 76 pp.

Saucier, G., Noreau, C., Casgrain, P., Côté, P., Larochelle, E., Bilodeau, M., Hayden, A., Poirier, E., Garon, M., Bertrand, V., Kissiova, M., Mailloux, M., Rougier, M., Camus, Y., and Gagnon, G., 2013. Feasibility study for the Kipawa project, Temiscamingue area, Québec, Canada. NI 43-101 technical report, 429p. < http://matamec.com/vns-site/uploads/documents/061623-003-finrep_matamec-n143-101-20131017-001-appen.pdf > Accessed September 8, 2015.

Schmidt, P., 2013. High-field-strength element distribution of the Eldor carbonatite complex, Canada. Unpublished MSc thesis, Tubingen University.

U.S. Department of Energy, 2010. Critical Materials strategy Summary <http://energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/Critical_Materials_Summary.pdf > Accès 1 février 2015.

Wright, W.R., Mariano, A.N. and Hagni, R.G., 1998. Pyrochlore, mineralization, and glimmerite formation in the Eldor (Lake LeMoyne) carbonatite complex, Labrador Trough, Quebec, Canada. In: Proceedings of the 33rd Forum on the Geology of Industrial Minerals. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; Special Vol. 50, pages 205-213.