



## **Classification des principaux indices en éléments des terres rares au Québec (Canada): Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique**

Anne-Aurélié Sappin et Georges Beaudoin

MB 2015-10

**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.

# **Classification des principaux indices en éléments des terres rares au Québec (Canada): Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique**

**Sappin, A.-A., Beaudoin, G.**

**2015**

## Résumé

Les éléments des terres rares (ETR) sont des matières premières critiques qui font l'objet d'un intérêt grandissant depuis quelques années. Ils sont utilisés dans une multitude d'industries de haute technologie (*e.g.*, énergie, transport, électronique, télécommunication) et sont vitaux à la croissance économique globale. Ces éléments incluent le groupe des lanthanides (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu), Sc et Y et sont contenus dans différentes espèces minérales, tel que les silicates, les carbonates, les oxydes, les phosphates, ou encore les argiles. Le contenu en ETR de ces minéraux est toutefois très variable et seul un petit nombre d'entre eux présente un intérêt économique, en particulier les minéraux contenant les ETR les plus rares (Nd, Eu, Tb, Dy et Y). L'essentiel de la production et des réserves en métaux rares dans le monde est détenu par la Chine. Cependant, le Québec contient des ressources substantielles qui sont actuellement en cours d'évaluation.

Au Québec, les occurrences, indices et gîtes en ETR sont subdivisés en six principaux types, soit 1) les gîtes primaires associés aux complexes de carbonatite, 2) les gîtes primaires associés aux roches ignées peralcalines, 3) les gîtes primaires associés à des gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au-ETR de types Kiruna ou Olympic Dam, 4) les gîtes primaires associés aux pegmatites granitiques, granites et migmatites hyperalumineux/métalumineux, ainsi qu'aux skarns, 5) les gîtes secondaires associés aux placers et paléoplacers, et 6) les gîtes secondaires associées aux argiles à adsorption ionique. Les gîtes primaires sont les plus nombreux sur le territoire québécois. Ils sont formés, de l'Archéen au Cénozoïque, à partir de processus magmatiques et/ou hydrothermaux dans des contextes intracontinentaux, le plus souvent en extension, à proximité de structures crustales majeures. Les gîtes secondaires sont plus rares. Ils se forment du Paléozoïque au Cénozoïque à la suite de processus sédimentaires et du lessivage dans des dépôts fluviaux, glaciaires, fluvio-glaciaires, de plage, de fond marin soulevé, de dune et de cône alluvial ou dans des argilites.

Parmi les nombreuses minéralisations en ETR identifiées au Québec, celles associées aux intrusions alcalines/hyperalcalines (*e.g.*, Montviel, Strange Lake, Kipawa) et aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au (*e.g.*, Kwyjibo) mis en place dans les terrains protérozoïques semblent cependant les plus prospectives. Ces minéralisations représentent aussi bien des sources en terres rares les

plus abondantes (*e.g.*, La, Ce) qu'en terres rares dont l'approvisionnement est plus critique (*e.g.*, Nd, Eu et Tb).

## Table des matières

RÉSUMÉ.....	ii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
LISTE DES ANNEXES.....	viii
INTRODUCTION .....	1
DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES .....	1
DÉFINITION DES ÉLÉMENTS DES TERRES RARES .....	1
ABONDANCE .....	3
MINÉRALOGIE.....	4
GÉOCHIMIE .....	8
PRODUCTION ET RESSOURCES MONDIALES.....	10
CLASSIFICATION DES INDICES EN ÉLÉMENTS DES TERRES RARES AU QUÉBEC .....	13
MÉTHODOLOGIE .....	13
MINÉRALISATION PRIMAIRE ASSOCIÉE À DES COMPLEXES DE CARBONATITE .....	16
Description générale .....	16
Exemples au Québec.....	16
Contexte géologique.....	19
Roches hôtes.....	20
Minéralisation .....	20
Âge de la minéralisation .....	20
Origine de la minéralisation .....	21
MINÉRALISATION PRIMAIRE ASSOCIÉE AUX ROCHES IGNÉES PERALCALINES .....	21
Description générale .....	21
Exemples au Québec.....	22
Contexte géologique.....	26
Roches hôtes.....	26
Minéralisation .....	26
Âge de la minéralisation .....	27
Origine de la minéralisation .....	27
MINÉRALISATION PRIMAIRE ASSOCIÉE À DES INDICES D’OXYDES DE FER, CUIVRE, OR ET ETR DE TYPES KIRUNA/ OLYMPIC DAM.....	27
Description générale .....	27
Exemples au Québec.....	28
Contexte géologique.....	29
Roches hôtes.....	30
Minéralisation .....	30
Âge de la minéralisation .....	30
Origine de la minéralisation .....	30
MINÉRALISATION PRIMAIRE SANS ASSOCIATION AVEC DES ROCHES IGNÉES ALCALINES.....	31
Description générale .....	31
Exemples au Québec.....	32
Contexte géologique.....	32
Roches hôtes.....	33
Minéralisation .....	33
Âge de la minéralisation .....	33
Origine de la minéralisation .....	34
MINÉRALISATION SECONDAIRE DANS LES PLACERS ET PALÉOPLACERS .....	34

<i>Description générale</i> .....	34
<i>Exemples au Québec</i> .....	35
<i>Contexte géologique</i> .....	35
<i>Dépôts hôtes</i> .....	35
<i>Minéralisation</i> .....	35
<i>Âge de la minéralisation</i> .....	36
<i>Origine de la minéralisation</i> .....	36
<b>MINÉRALISATION SECONDAIRE DANS DES ARGILES À ADSORPTION IONIQUE</b> .....	36
<i>Description générale</i> .....	36
<i>Exemple au Québec</i> .....	37
<i>Contexte géologique</i> .....	37
<i>Dépôts hôtes</i> .....	37
<i>Minéralisation</i> .....	37
<i>Âge de la minéralisation</i> .....	38
<i>Origine de la minéralisation</i> .....	38
<b>ÉVALUATION DU POTENTIEL ÉCONOMIQUE</b> .....	38
<b>CONCLUSION</b> .....	39
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	40
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	41

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Identification des éléments des terres rares (encadrés en rouge) dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev. ....	2
<b>Figure 2.</b> A. Abondance des ETR dans le manteau primitif (données d'après McDonough et Sun, 1995) et la croûte continentale (données d'après Rudnick et Gao, 2014). Abondance d'Ag et Sn donnée à des fins de comparaison. B. Rayon ionique effectif des cations trivalents (en gris), de $Ce^{4+}$ et $Eu^{2+}$ , tous dans une coordination octuple (d'après Shannon, 1976). Le numéro atomique (Z) de chaque élément est indiqué sous celui-ci. Figure modifiée d'après Chakhmouradian et Wall (2012). ....	4
<b>Figure 3.</b> Rayon ionique versus charge ionique d'éléments traces d'intérêt d'après Rollinson (1993). Les ETR sont indiqués en rouge. ....	9
<b>Figure 4.</b> Matières premières critiques en 2010 selon l'Union Européenne ( <a href="http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical">http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical</a> ). ....	11
<b>Figure 5.</b> A. Production minière et B. réserves mondiales en ETR en 2014. Données tirées d'USGS (2015). ....	12
<b>Figure 6.</b> Localisation des principales minéralisations en ETR au Québec, dont 1- le gîte d'Eldor, 2- le gîte de Strange Lake, 3- le gîte de Misery Lake, 4- la propriété de Kwyjibo, 5- le gîte de Montviel, 6- le gîte du lac Shortt, 7- le gîte de Grande-Vallée, 8- l'indice Haltaparche, 9- le gîte de Kipawa, 10- l'indice Baie-Mercier, 11- l'indice Wares, et 12- la mine St-Lawrence Columbium et le gîte Niocan. ....	15
<b>Figure 7.</b> Carte géologique du complexe de carbonatite de Montviel, sous le mort-terrain (~50m). Figure modifiée d'après Nadeau <i>et al.</i> (2015). ....	18
<b>Figure 8.</b> Carte géologique du complexe de carbonatite d'Oka et localisation des gîtes de Nb associés, incluant l'ancienne mine St-Lawrence Columbium (SLC), le gisement de Niocan et celui de Bond zone. Figure modifiée d'après Chen (2014). ....	19
<b>Figure 9.</b> A. Carte géologique de l'intrusion granitique peralcaline de Strange Lake. B. Bloc modèle schématique de la « B-Zone ». Figure modifiée d'après Gysi et Williams-Jones (2013). ....	23
<b>Figure 10.</b> Carte géologique de l'intrusion syénitique peralcaline de Misery Lake. Figure modifiée d'après Petrella (2012). ....	24
<b>Figure 11.</b> A. Carte de localisation du front du Grenville (FG) dans la région de Kipawa. B. Carte géologique simplifiée de la région de Kipawa. Figure modifiée d'après van Breemen et Currie (2004). ....	25
<b>Figure 12.</b> Carte géologique de la propriété Kwyjibo. Figure modifiée d'après Gauthier <i>et al.</i> (2004). ....	29



## Liste des tableaux

<b>Table 1.</b> Principaux minéraux contenant des ETR <sup>a</sup> (modifiée d'après Chakhmouradian et Wall, 2012 et Linnen <i>et al.</i> , 2014).....	6
--	---

## Liste des annexes

<b>Annexe 1.</b> Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM).....	50
--	----

## **Introduction**

De nos jours, les éléments des terres rares (ETR) sont devenus un enjeu commercial majeur en raison de leur lien incontournable avec les avancées technologiques modernes. Ces éléments sont aussi bien utilisés dans l'industrie pétrolière (*e.g.*, raffinage), l'industrie automobile (*e.g.*, véhicules hybrides et électriques), l'électronique (*e.g.*, ordinateur, téléphone portable), les télécommunications (*e.g.*, fibre optique) et bien d'autres domaines encore. Le quasi-monopole de la Chine sur le marché des ETR de ces dernières années, et son utilisation géopolitique de l'approvisionnement mondial, a conduit à la nécessité de découvrir de nouvelles sources en ETR en dehors de ce pays. Le Québec possède une grande variété d'indices, de gîtes et de gisements d'ETR qui sont contenus dans différents types de roches hôtes (*e.g.*, carbonatite, roches ignées peralcalines à peralumineuses, placer). Grâce à ces nombreuses occurrences minéralisées et à leur diversité, la province pourrait contribuer de façon majeure à la production mondiale des ETR.

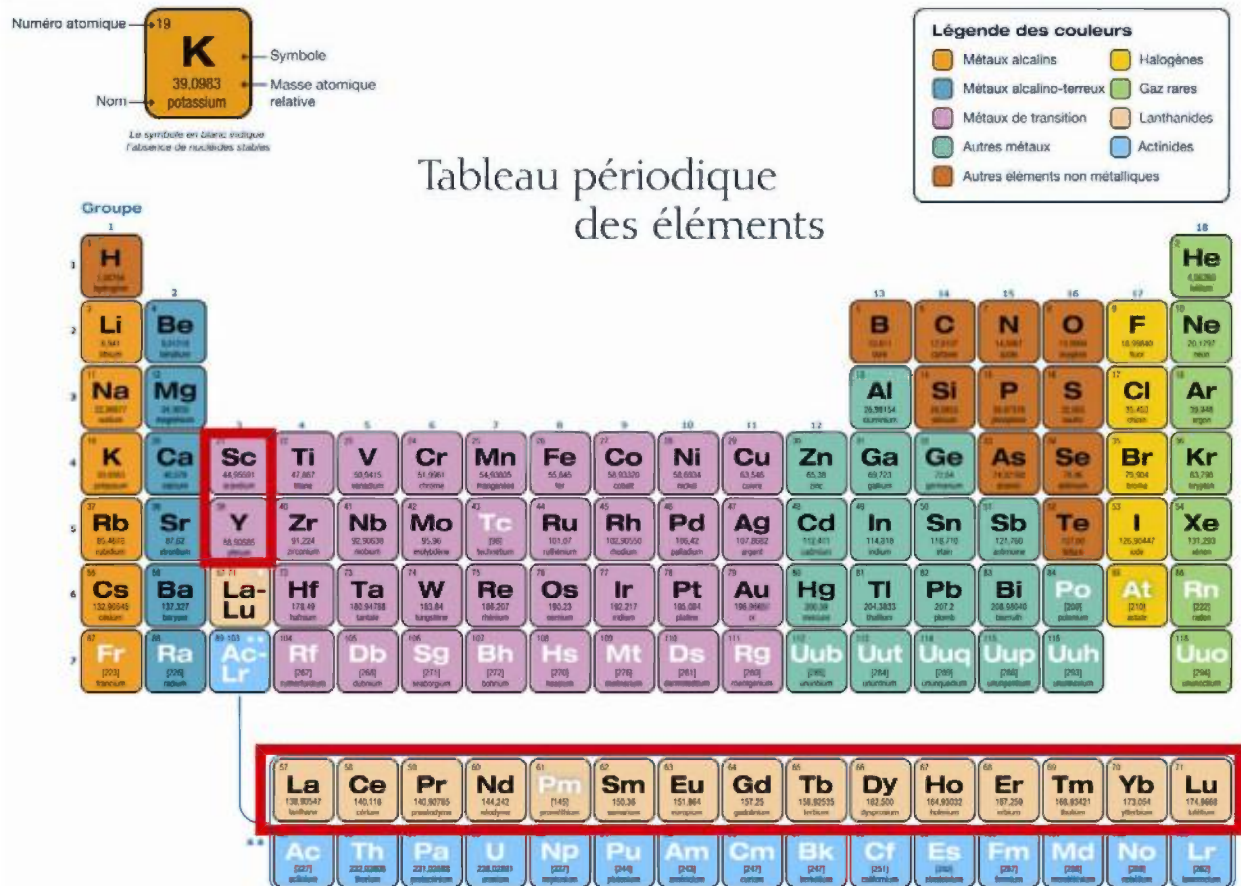
Dans cette contribution, nous présentons et décrivons les principaux types de gîtes d'ETR présents au Québec, avec pour chaque catégorie une description générale, des exemples d'occurrences minéralisées, le contexte géologique, la nature des roches ou dépôts hôtes, les principales caractéristiques des minéralisations, leur âge et l'origine des indices minéralisés. Ces descriptions nous permettront d'évaluer l'intérêt économique des minéralisations en ETR au Québec et d'identifier les cibles ayant le plus fort potentiel.

## **Définition et caractéristiques**

### **Définition des éléments des terres rares**

D'après l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UICPA), les ETR, communément appelés terres rares, regroupent 17 métaux chimiquement similaires incluant le groupe des lanthanides, le scandium (Sc) et l'yttrium (Y) (Fig. 1). Les lanthanides comprennent les 15 éléments chimiques dont le numéro atomique varie de 57 à 71, soit le lanthane (La), le cérium (Ce), le praséodyme (Pr), le néodyme (Nd), le prométhium (Pm), le samarium (Sm), l'euporium (Eu), le gadolinium (Gd), le terbium (Tb), le dysprosium (Dy), l'holmium (Ho), l'erbium (Er), le thulium (Tm), l'ytterbium (Yb) et le lutétium (Lu) (Fig. 1). Sc, de numéro atomique 21, et Y, de numéro atomique 39, appartiennent aux métaux de transition du groupe 3

dans le tableau périodique des éléments (Fig. 1). Ces deux éléments sont également considérés comme des ETR en raison de leurs caractéristiques chimiques et physiques comparables à celles des lanthanides et de leur association étroite avec ces métaux dans les indices minéralisés (McLennan et Taylor, 2012; Jaireth *et al.*, 2014).



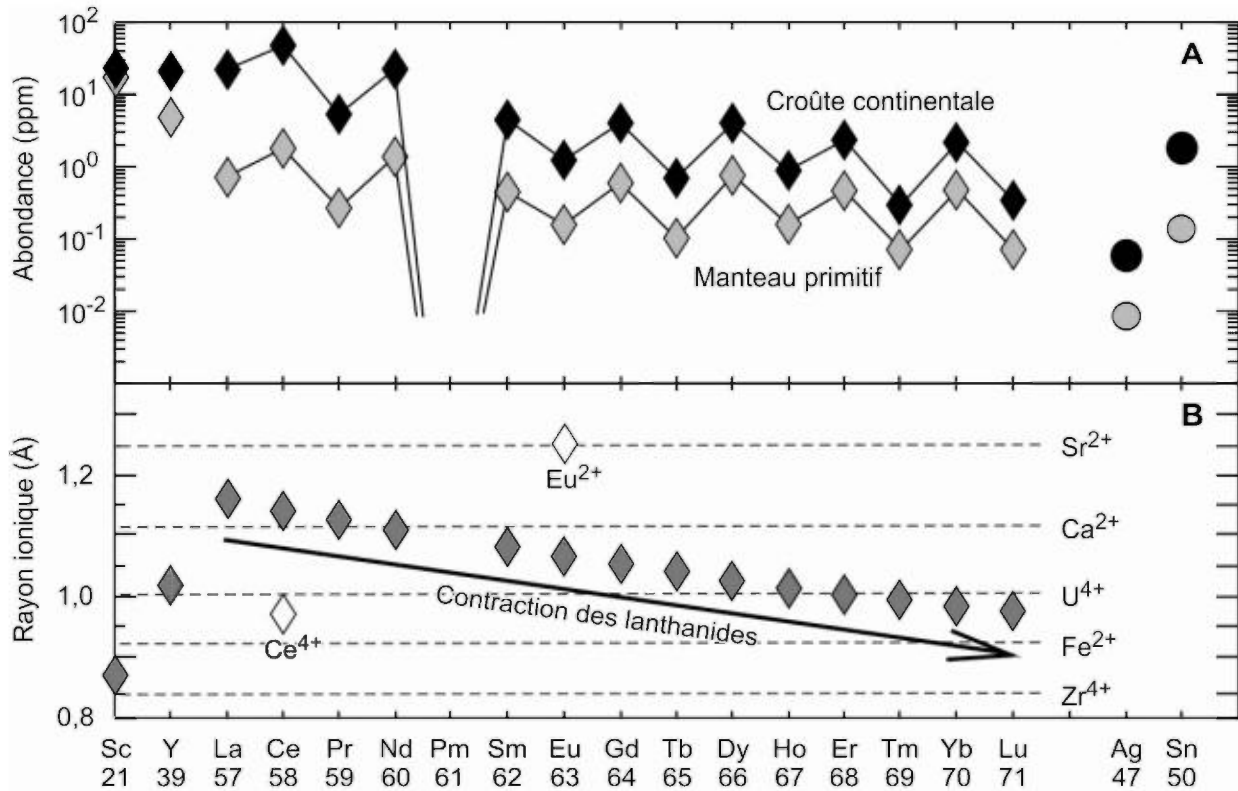
**Figure 1.** Identification des éléments des terres rares (encadrés en rouge) dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev.

Traditionnellement, les lanthanides avec les plus petits numéros atomiques (La à Eu) sont classés dans le sous-groupe des terres rares légères (*LREE = light rare earth elements*) et ceux présentant les numéros atomiques les plus élevés (Gd à Lu) sont classés dans le sous-groupe des terres rares lourdes (*HREE = heavy rare earth elements*) (e.g., Rollinson, 1993; Linnen *et al.*, 2014). Malgré un numéro atomique bas, Y présente un rayon ionique similaire à celui de Ho (Rollinson, 1993) et se comporte de manière identique à ce dernier (McLennan et Taylor, 2012).

Il est donc inclus dans le sous-groupe des terres rares lourdes. Dans la littérature, certains auteurs utilisent également le terme terres rares intermédiaires (*MREE = middle rare earth elements*) pour désigner un sous-groupe comprenant les lanthanides avec un numéro atomique intermédiaire (Sm à Ho; *e.g.*, Rollinson, 1993).

### **Abondance**

Le terme « ETR », utilisé depuis les 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècles afin de rendre compte de la rareté des minéraux contenant ces éléments, apparaît comme étant mal approprié. En effet, les terres rares sont des éléments présents en quantité trace dans la grande majorité des contextes géologiques (Fig. 2A). Dans la croûte terrestre, certains sont même relativement abondants comparé à d'autres métaux (Fig. 2A). Ainsi, Ce avec 43 ppm, La avec 20 ppm, Nd avec 20 ppm, et Y avec 19 ppm sont par exemple plus abondants dans la croûte continentale que Co avec 27 ppm, Pb avec 11 ppm, Sn avec 1,7 ppm, W avec 1 ppm, et Mo avec 0,8 ppm (Rudnick et Gao, 2014). Au contraire, quelques ETR, dont plusieurs éléments stratégiques sur le marché mondial, sont moins abondants dans la croûte continentale, avec par exemple 0,6 ppm de Tb et 0,3 ppm de Tm (Rudnick et Gao, 2014). L'abondance relative des ETR dans la croûte terrestre varie généralement selon deux grands principes, soit 1) la prédominance des éléments chimiques avec un numéro atomique pair sur les éléments chimiques adjacents avec un numéro atomique impair dans le système solaire, en raison de la plus grande stabilité de leur noyaux atomique (effet Oddo-Harkins), et 2) la prédominance des terres rares légères sur les terres rares lourdes dans la croûte terrestre (Fig. 2A), liée au fait que les terres rares légères sont des éléments plus incompatibles que les terres rares lourdes (Walters *et al.*, 2011).



**Figure 2.** A. Abondance des ETR dans le manteau primitif (données d'après McDonough et Sun, 1995) et la croûte continentale (données d'après Rudnick et Gao, 2014). Abondance d'Ag et Sn donnée à des fins de comparaison. B. Rayon ionique effectif des cations trivalents (en gris), de  $Ce^{4+}$  et  $Eu^{2+}$ , tous dans une coordination octupule (d'après Shannon, 1976). Le numéro atomique (Z) de chaque élément est indiqué sous celui-ci. Figure modifiée d'après Chakhmouradian et Wall (2012).

## Minéralogie

Les minéraux contenant des ETR se répartissent en plusieurs catégories, 1) les minéraux dans lesquelles les terres rares constituent un composant essentiel, aussi appelé minéraux de terres rares, 2) les minéraux présentant de fortes teneurs en terres rares en raison de substitutions ioniques, 3) les minéraux enrichis en terres rares suite aux conditions de cristallisation, et 4) les argiles à adsorption ionique. Les minéraux dans lesquelles les terres rares sont des composants essentiels représentent environ 12 % de toutes les espèces minérales connues à ce jour (Linnen *et al.*, 2014). Chaque année cette liste s'allonge grâce à la découverte de nouvelles espèces. Ces minéraux appartiennent pour l'essentiel au groupe des silicates (*e.g.*, gadolinite-(Ce), allanite-

(Ce); l'élément chimique entre parenthèses correspond à l'ETR prépondérant dans la composition du minéral), suivi du groupe des carbonates (*e.g.*, bastnäsite-(Ce), parisite-(Ce)), des oxydes (*e.g.*, aeschynite-(Ce), euxenite-(Y)), des phosphates et sels oxydés associés (*e.g.*, monazite-(Ce), xenotime-(Y)), et plus rarement des sulfates (*e.g.*, sejkoraite-(Y)). En raison de la prédominance de certains ETR dans la croûte terrestre, les minéraux de terres rares sont dominés par les espèces minérales contenant Ce, Y, La, et Nd, et par quelques espèces minérales contenant des terres rares avec un numéro atomique pair (Chakhmouradian et Wall, 2012). Plusieurs minéraux présentent également de fortes teneurs en terres rares, suite à la substitution de certains de leurs cations par des ETR présentant un rayon ionique et une charge comparable (*e.g.*, l'apatite qui peut incorporer des ETR dans les sites Ca de sa structure cristalline). D'autres minéraux peuvent présenter un enrichissement en ETR en fonction de leur environnement de cristallisation (*e.g.*, titanite, zircon, pyrochlore). Enfin, un dernier groupe de minéraux comprend les argiles alumineuses à fort potentiel d'adsorption ionique qui peuvent adsorber les terres rares sous forme de cations. Les principaux minéraux contenant des ETR sont présentés dans la Table 1.

Le contenu en ETR de l'ensemble de ces minéraux varie en fonction des contraintes structurales, tel que la coordination des cations ou les distances cation-ligand, et de la disponibilité relative de ces éléments chimiques dans leur environnement de formation (Chakhmouradian et Wall, 2012; Linnen *et al.*, 2014). Malgré l'abondance des minéraux contenant des ETR, seul un petit nombre d'entre eux présente un intérêt économique. Ces minéraux doivent contenir des métaux facilement extractibles, former des gîtes à fort tonnage, et renfermer idéalement peu d'éléments radioactifs et toxiques (*e.g.*, Th, U et Sb). Ainsi, présentement, les ETR sont issus de moins d'une vingtaine de minéraux (Chakhmouradian et Wall, 2012). Les terres rares légères sont principalement extraites de la bastnäsite et de la monazite et les terres rares lourdes proviennent pour l'essentiel de l'exploitation du xenotime-(Y), des argiles à adsorption ionique et de la synchysite-(Y) (Hatch, 2012).

**Table 1.** Principaux minéraux contenant des ETR<sup>a</sup> (modifiée d'après Chakhmouradian et Wall, 2012 et Linnen *et al.*, 2014).

Minéral <sup>b</sup>	Formule chimique <sup>c</sup>	Gamme des valeurs ou valeurs maximum en ETR	Principaux types de gîte <sup>d</sup>	Exemple de gîte
Bastnäsité	ETRCO <sub>3</sub> (F,OH)	53–79 %poids ΣREO	Carbonatites et roches métasomatiques associées, roches peralcalines altérées	Mountain Pass (USA); Bayan Obo, Weishan et Maoniuping (China); Nechalacho (Canada)
Parisite	CaETR <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	58–63 %poids ΣREO	Carbonatites et roches métasomatiques associées, gîtes hydrothermaux	Mountain Pass et Snowbird (USA); Bayan Obo et Weishan (China)
Synchysite	CaETR(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (F,OH)	48–52 %poids ΣREO	Carbonatites et roches métasomatiques associées, roches peralcalines altérées	Barra do Itapirapuã (Brésil); Lugiin Gol (Mongolie); Nechalacho (Canada)
Monazite	(ETR,Th,Ca,Sr)(P,Si,S)O <sub>4</sub>	38–71 %poids ΣREO	Carbonatites et roches métasomatiques associées, nelsonite riche en P, croûtes lessivées, placers	Mountain Pass (USA); Bayan Obo (China); Eneabba et Mt Weld (Australia); Tomtor (Russie)
Xenotime	(ETR,Zr,U)(P,Si)O <sub>4</sub>	43–65 %poids ΣREO	Carbonatites et roches métasomatiques associées, croûtes lessivées, placers	Lofdal (Namibie); Pitinga (Brésil); Tomtor (Russie); Mt Weld (Australie)
Churchite	ETRPO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	43–56 %poids ΣREO	Croûtes lessivées	Chuktukon (Russie); Mt Weld (Australie)
Gadolinite	ETR <sub>2</sub> FeBe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	45–54 %poids ΣREO	Pegmatites granitiques	Ytterby (Suède); Strange Lake (Canada); Barringer Hill (USA)
Rutile	(Ti,Nb,Ta,Fe,Sn)O <sub>2</sub>	≤56 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤34 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤7 %poids SnO <sub>2</sub>	Roches métasomatiques à carbonate, pegmatites granitiques, placers, croûtes lessivées	Bayan Obo (Chine); Greenbushes (Australie); Kinta Valley (Malaisie)
Loparite	(Na,ETR,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Ta)O <sub>3</sub>	28–38 %poids ΣREO, ≤20 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤1 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Roches peralcalines	Karnasurt et Umbozero (Russie)
Fergusonite	ETRNbO <sub>4</sub>	43–57 %poids ΣREO, 40–55 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤0,8 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Roches métasomatiques à carbonate et roches peralcalines, pegmatites granitiques	Bayan Obo (Chine); Barringer Hill (USA); Nechalacho (Canada)
Columbite–tantalite	(Fe,Mn,Mg)(Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	≤72 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤85 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Carbonatites et roches métasomatiques associées, granites, pegmatites granitiques, placers	Blue River (Canada); Bayan Obo (Chine); Greenbushes et Wodgina (Australie)



**Table 1.** Principaux minéraux contenant des ETR<sup>a</sup> (modifiée d'après Chakhmouradian et Wall, 2012 et Linnen *et al.*, 2014) (suite).

Minéral <sup>b</sup>	Formule chimique <sup>c</sup>	Gamme des valeurs ou valeurs maximum en ETR	Principaux types de gîte <sup>d</sup>	Exemple de gîte
Tapiolite	(Fe,Mn)(Ta,Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	72–86 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤9 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pegmatites granitiques	Tanco (Canada); Greenbushes (Australie)
Wodginite	(Mn,Fe)(Sn,Ti)(Ta,Nb) <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	56–85 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤15 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 3– 18 %poids SnO <sub>2</sub>	Pegmatites granitiques	Tanco (Canada); Greenbushes et Wodgina (Australie)
Ixiolite	(Ta,Nb,Mn,Fe,Sn,Ti) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	70 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤72 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤20 %poids SnO <sub>2</sub>	Pegmatites granitiques	Tanco (Canada); Borborema (Brésil)
Pyrochlore	(Ca,Na,Sr,Ba,Pb,K,U) <sub>2-x</sub> (Nb,Ti,Ta,Zr,Fe) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (F,OH) <sub>1-y</sub> • nH <sub>2</sub> O	29–77 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤16 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤22 %poids ΣREO	Carbonatites et phoscorites associées, granites peralcalins et pegmatites associées, fenites, croûtes lessivées	Barreiro et Catalão I et II (Brésil); Oka, Niobec, Strange Lake, Montviel et Crevier (Canada); Tomtor, Chuktukon et Tatarskoye (Russie)
Microlite	(Ca,Na,Pb,U,Sb,Bi) <sub>2-x</sub> (Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F) <sub>1-y</sub>	46–81 %poids Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤20 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ≤9 %poids SnO <sub>2</sub>	Pegmatites granitiques et granites	Tanco (Canada); Greenbushes (Australie)
Baddeleyite	(Zr,Hf,Nb,Fe)O <sub>2</sub>	88–99 %poids ZrO <sub>2</sub> , ≤4,8 %poids HfO <sub>2</sub> , ≤6,5 %poids Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phoscorites, syénites peralcalines altérées, roches métasomatiques à carbonate, placers	Kovdor et Algama (Russie); Palabora (South Africa); Poços de Caldas (Brésil)
Zircon	(Zr,Hf,ETR,Th,U) (Si,P)O <sub>4</sub>	64–67 %poids ZrO <sub>2</sub> , ≤1,5 %poids HfO <sub>2</sub> , ≤19 %poids ΣREO	Placers, syénites peralcalines (incluant les variétés altérées)	Jacynth-Ambrosia et Eneabba (Australie); Richards Bay (South Africa); Nechalacho (Canada)

<sup>a</sup>Ce tableau n'inclut pas les minéraux qui peuvent contenir des quantités appréciables d'ETR, mais dont la présence n'est pas essentielle (*e.g.*, apatite, cassitérite), ainsi que les minéraux dont le potentiel industriel comme ressource d'ETR reste à démontrer (*e.g.*, allanite, britholite, eudialyte, gagarinite, gerenite, gittinsite, kainosite, mosandrite, steenstrupine, vlasovite).

<sup>b</sup>La plupart des minéraux présentés dans ce tableau font partis de solutions solides multi-composantes (*e.g.*, les séries columbite–tantalite incorporent columbite-(Fe), columbite-(Mn), tantalite-(Mn)...). Par souci de simplicité, les noms des minéraux donnés ici correspondent à la terminologie historique utilisée dans la littérature géologique et les rapports d'exploration.

<sup>c</sup>Seules les concentrations d'éléments pertinents à l'exploitation commerciale des ressources sont présentées dans ce tableau. Les variations compositionnelles actuelles de certains de ces minéraux sont plus importantes qu'indiquées.

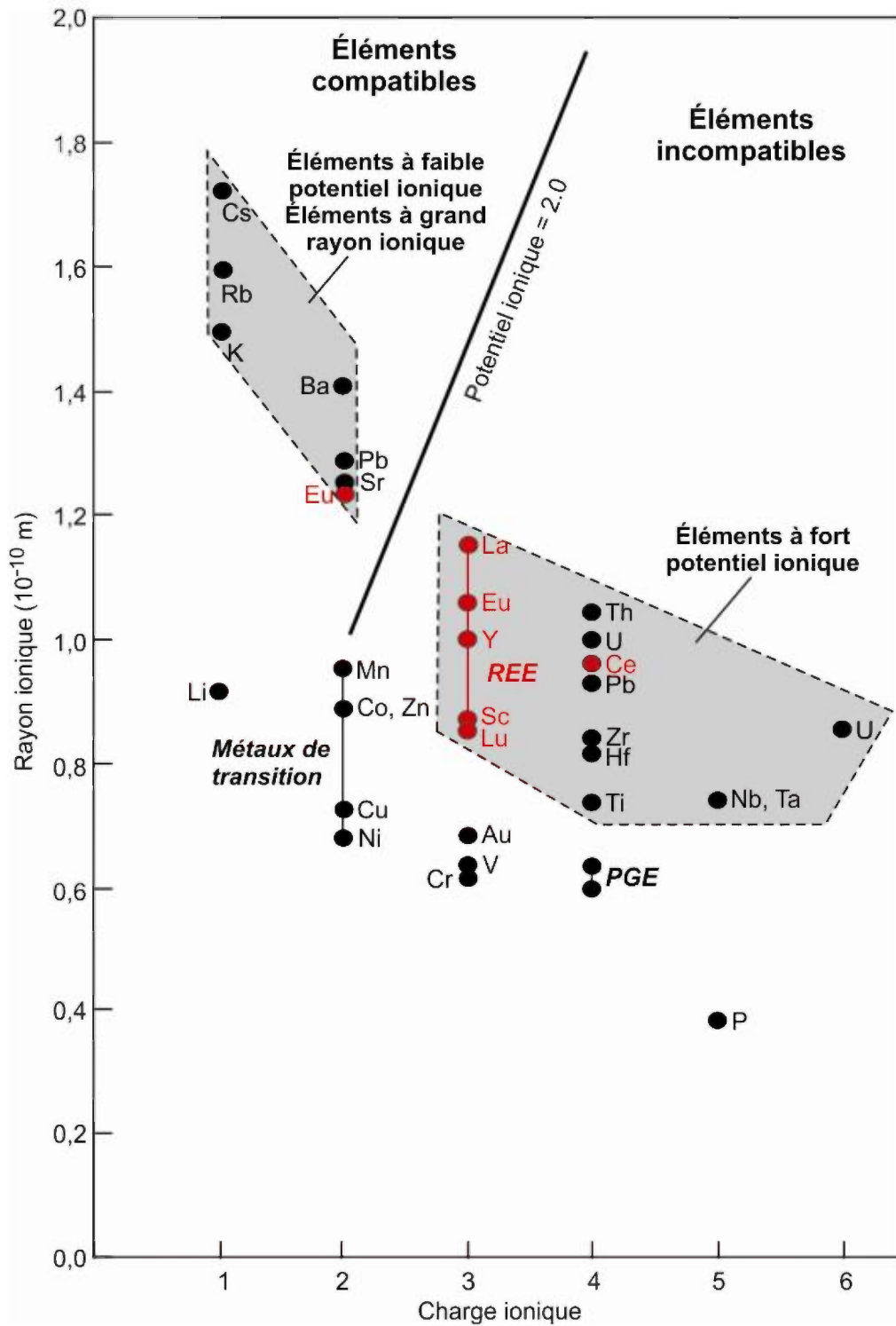
<sup>d</sup>Les principaux types de gîte énumérés ici comprennent seulement les types de gîte qui ont ou peuvent présenter un intérêt économique.

## Géochimie

Dans l'ensemble, les ETR forment des ions trivalents stables de taille comparable (Rollinson, 1993). Seuls quelques uns peuvent présenter, dans certains environnements, un état de valence différent de +3 (*e.g.*,  $Ce^{4+}$  et  $Eu^{2+}$ ; Rollinson, 1993). En raison de leur état d'oxydation et de leur rayon ionique très similaires, exception faite de Sc, ces éléments peuvent se substituer l'un avec l'autre dans les structures cristallines et ainsi donner naissance à un même minéral contenant une variété d'ETR (Walters *et al.*, 2011).

Les ETR présentent des variations systématiques de leur comportement (*e.g.*, répartition des éléments entre liquide/cristaux ou liquide/liquide, complexation) principalement dues à la décroissance régulière du rayon ionique avec l'augmentation du numéro atomique (Linnen *et al.*, 2014), caractéristique aussi nommée « contraction des lanthanides » (Fig. 2B). Par exemple, lors de la fusion partielle du manteau supérieur, l'affinité des ETR pour les magmas s'accroît avec l'augmentation du rayon ionique (Chakhmouradian et Wall, 2012). Ainsi, lors de ce processus, les terres rares légères qui se caractérisent par des rayons ioniques plus grands sont généralement plus incompatibles que les terres rares lourdes. Les variations des sites de coordination minérale, de l'état d'oxydation et du type de liaison chimique peuvent aussi expliquer le fractionnement des ETR dans les systèmes naturels (Chakhmouradian et Wall, 2012; McLennan et Taylor, 2012). Par exemple, Y et Ho présentent des affinités différentes durant la précipitation de la calcite à partir de l'eau de mer (Tanaka *et al.*, 2008) et  $Eu^{2+}$  est incorporé préférentiellement par rapport aux autres ETR trivalent dans les plagioclases (substitution avec Ca) sous des conditions de fugacité d'oxygène faible (Weill *et al.*, 1974).

Les ETR sont des éléments lithophiles (Henderson, 1984). Leur potentiel ionique, ou rapport charge sur rayon ionique, étant élevé, ils appartiennent au groupe des éléments à fort potentiel ionique (*HFSE = high field strength elements*; Fig 3) et dans l'ensemble tendent à se concentrer préférentiellement dans les liquides magmatiques et les phases cristallines tardives (Rollinson, 1993).  $Eu^{2+}$  fait cependant exception puisqu'il appartient au groupe des éléments à grand rayon ionique (*LILE = large-ion lithophile elements*; Fig 3) et se comporte plutôt comme un élément compatible (Rollinson, 1993).



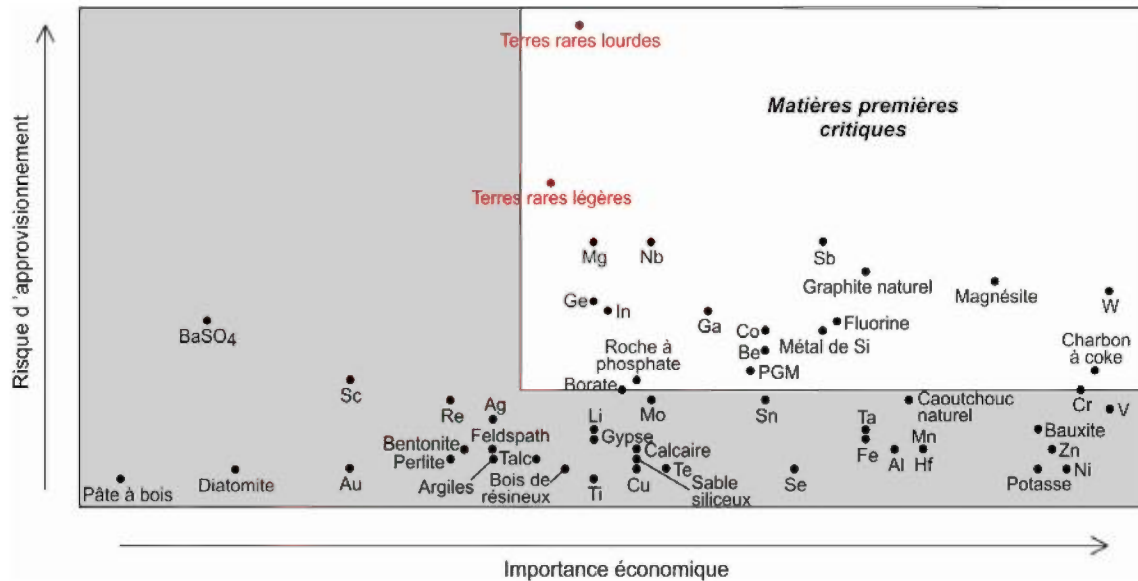
**Figure 3.** Rayon ionique versus charge ionique d'éléments traces d'intérêt d'après Rollinson (1993). Les ETR sont indiqués en rouge.

Dans les systèmes d'altération impliquant des fluides aqueux, les ETR sont relativement résistants aux modifications et aux remobilisations en raison de leurs très faibles coefficients de partage fluide/roche (McLennan et Taylor, 2012). Cependant, ces éléments sont remobilisés sous la plupart des conditions de lessivage, de diagenèse, d'activité hydrothermale et de métamorphisme lorsque les ratios fluide/roche sont élevés (McLennan et Taylor, 2012).

Dans les systèmes aqueux, les ETR sont relativement insolubles (Linnen *et al.*, 2014). D'après McLennan et Taylor (2012), ils se présentent principalement, à de très faibles concentrations, sous forme de complexes avec des métaux, des espèces carbonatées et des espèces bicarbonatées. Pour certains complexes d'ETR qui peuvent exister dans la nature dans des systèmes de fluides magmatiques, de fluides hydrothermaux, ou de fluides riches en fluorures, chlorures, sulfates, hydroxydes ou carbonates, ces auteurs indiquent que leur stabilité tend à augmenter avec l'augmentation de la température, la diminution de la pression et la présence des terres rares les plus lourdes. Ils mentionnent également que, dans les systèmes aqueux, la concentration en ETR tend à augmenter avec la diminution du pH.

### **Production et ressources mondiales**

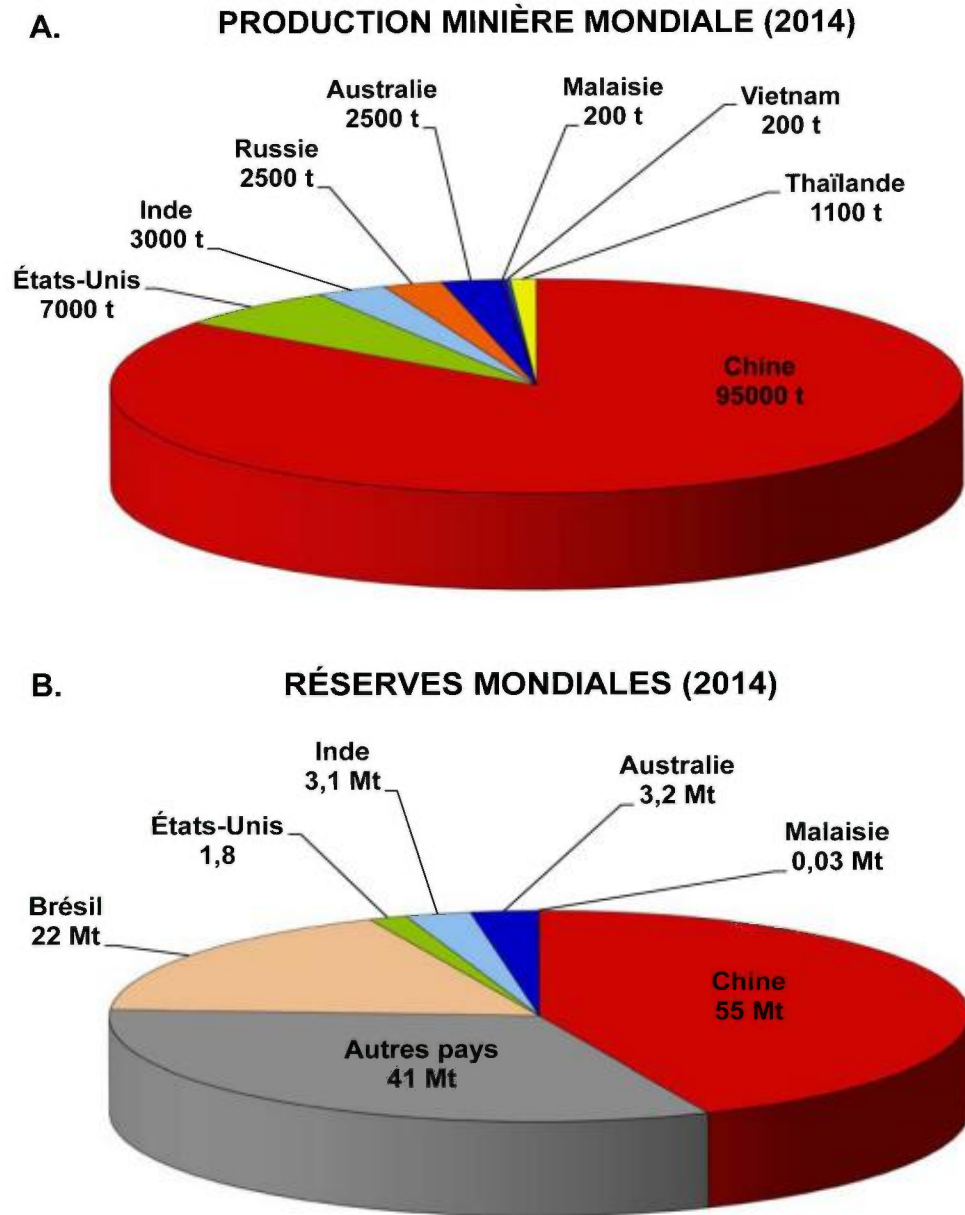
Les ETR appartiennent au groupe des matières premières critiques, tel que défini en 2010 par l'Union Européenne (Fig. 4). Ces matières premières sont des éléments économiquement importants dont la demande pourrait, dans un futur proche, excéder les ressources disponibles. Si tous les ETR sont inclus dans cette catégorie, Nd, Eu, Tb, Dy et Y sont plus rares et donc particulièrement recherchés. En termes de valeur, Nd et Pr dominent le marché global des ETR, suivis d'Eu et Tb (Lehmann, 2014). Au contraire, en termes de tonnage, le marché est dominé par La et Ce, des terres rares légères (Lehmann, 2014).



**Figure. 4.** Matières premières critiques en 2010 selon l'Union Européenne (<http://ec.europa.eu/entreprise/policies/raw-materials/critical>).

De nos jours, la Chine est toujours le principal producteur d'ETR avec une production en 2014 de 95 000 tonnes (Fig. 5A), soit 85 % de la production mondiale en ETR. Les gîtes chinois sont majoritairement associés, directement ou indirectement, à des carbonatites localement très métamorphisées (*e.g.*, gisement géant de Fe-ETR-Nb de Bayan Obo avec des ressources estimées à 1,5 Gt avec 35 % Fe et jusqu'à 5-6 % d'oxydes de terres rares (*REO = rare earth oxide*); Lehmann, 2014) et, dans une moindre mesure, à des argiles à adsorption ionique (*e.g.*, gisement riche en terres rares lourdes de Ganzhou). Malgré leur faible teneur en ETR ( $\leq 0,3\%$  d'oxydes de terres rares; Chakhmouradian et Wall, 2012), ces argiles riches en terres rares lourdes sont facilement extraites et traitées et permettent une exploitation minière à faible coût. Les États-Unis sont le deuxième producteur d'ETR, très loin derrière la Chine, avec une production en 2014 de 7 000 tonnes (Fig. 5A), soit 6 % de la production mondiale en ETR. La production américaine est principalement liée au gisement riche en terres rares légères de Mountain Pass en Californie (18 Mt de réserves avec une teneur moyenne de 8 % d'oxydes de terres rares; Lehmann, 2014), gisement associé à des carbonatites. Au Canada, et plus particulièrement au Québec, aucune mine d'ETR n'est actuellement en exploitation même si plusieurs projets ont atteint des étapes avancées d'exploration (*e.g.*,

gisement d'Hoidas Lake au Saskatchewan, gisement de Thor Lake dans les Territoires du Nord-Ouest, gisement de Strange Lake au Québec).



**Figure 5.** A. Production minière et B. réserves mondiales en ETR en 2014. Données tirées d'USGS (2015).

Les réserves mondiales en oxydes de terres rares sont également majoritairement contenues par la Chine avec 44 % des réserves en 2014 (Fig. 5B). Le reste est réparti essentiellement entre le Brésil (17 %), l’Australie (3 %), l’Inde (2 %) et les Etats-Unis (1 %) (Fig. 5B). La part du Canada reste encore à évaluer, car ses réserves en ETR sont encore mal définies.

## **Classification des indices en éléments des terres rares au Québec**

Les gîtes d’ETR sont encaissés dans des roches ignées, sédimentaires et métamorphiques et peuvent se retrouver dans une variété de contexte géologique. Il est donc primordial de les classer en fonction de critères communs afin de pouvoir les comparer adéquatement.

### **Méthodologie**

La concentration et la distribution des ETR dans les occurrences minéralisées sont fonction de nombreux processus, dont l’enrichissement dans des fluides magmatiques et hydrothermaux, la répartition dans les phases cristallines et leur précipitation, et la remobilisation et la concentration tardive en lien avec le lessivage et autres processus superficiels (Jaireth *et al.*, 2014). Ainsi, Walters *et al.* (2011) proposent de subdiviser les gîtes d’ETR en deux grandes catégories, avec 1) les gîtes primaires formés à partir de processus magmatiques et hydrothermaux et 2) les gîtes secondaires formés à partir de processus sédimentaires et du lessivage. Par la suite, ces auteurs subdivisent les gîtes primaires et secondaires en fonction de leur association génétique, de leur minéralogie et de leur forme. Les gîtes primaires ont été subdivisés en quatre sous-classes, soit 1) les gîtes qui ont une association spatiale et génétique avec les carbonatites et les roches ignées associées, 2) les gîtes qui ont une association spatiale et génétique avec les roches ignées peralcalines, 3) les gîtes d’oxydes de fer et d’ETR (incluent dans le groupe des gîtes d’oxydes de fer, cuivre, or de types Kiruna et Olympic Dam), et 4) les gîtes hydrothermaux, non reliés aux roches ignées alcalines, incluant les pegmatites d’origine variée, les skarns et les veines polymétalliques à quartz et fluorite. Les gîtes secondaires ont quant à eux été subdivisés en cinq sous-classes, soit 1) les placers d’origine marine, 2) les placers alluviaux, 3) les paléoplacers, 4) les dépôts latéritiques, et 5) les argiles à

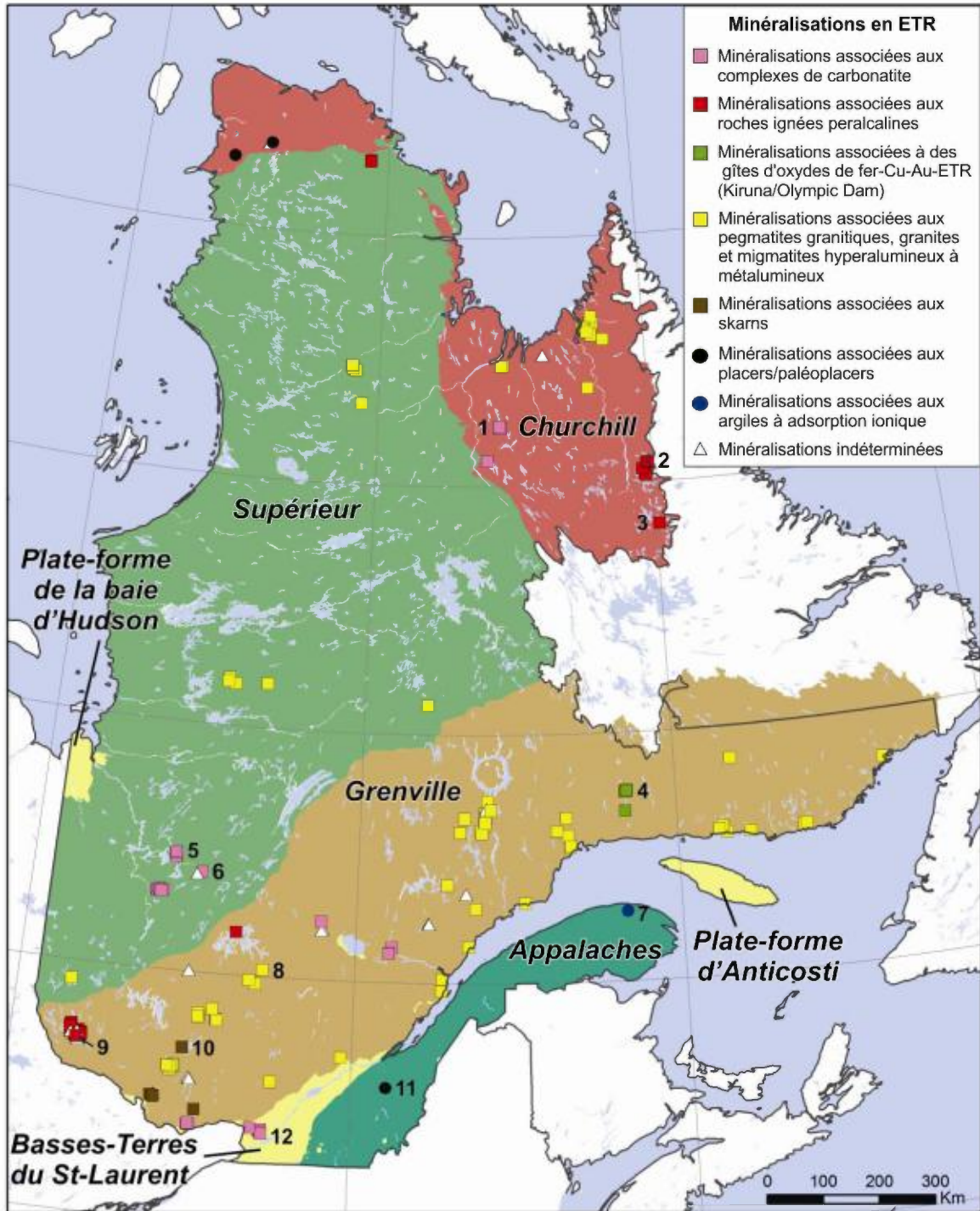
adsorption ionique. Dans certains cas, la classification peut cependant être compliquée par une association génétique indéterminée et/ou par l'implication de plusieurs processus géologiques.

Un premier inventaire des principaux types de minéralisation en métaux rares au Québec a été réalisé par Gosselin *et al.* (2003) et Boily et Gosselin (2004). Après une compilation minutieuse, ces auteurs ont identifié 297 indices, prospects et gisements contenant des ETR, mais aussi Zr, Nb, Ta, Be et Li et les ont classés selon 7 catégories en fonction des processus qui ont conduit à leur mise en place, soit 1) les gîtes associés à des complexes granitiques hyperalumineux, 2) les gîtes associés à des complexes de carbonatite, 3) les gîtes associés à des complexes hyperalcalins, 4) les gîtes associés à des placers ou à des paléoplacers, 5) les gîtes d'oxydes de fer, cuivre, or et ETR (*e.g.*, Olympic Dam, Kiruna), 6) les gîtes U-Th±ETR associés à des pegmatites granitiques, migmatites et granites hyperalumineux à métalumineux, et 7) les gîtes Th-U±ETR associés aux roches calco-silicatées et métasomatisées ou skarns.

Dans cette synthèse, nous reprenons les travaux de Gosselin *et al.* (2003) et Boily et Gosselin (2004) et effectuons une mise à jour de ces derniers en incluant les découvertes de ces dix dernières années et en utilisant la classification simplifiée proposée par Walters *et al.* (2011) pour subdiviser et décrire les principales occurrences minéralisées en ETR au Québec. Il est à noter qu'au Québec, les indices en ETR de type secondaire sont rares. Ainsi, les indices associés aux différents placers et paléoplacers sont regroupés dans une seule et même sous-classe. De plus, en raison de l'absence d'indices associés aux dépôts latéritiques, cette sous-classe a été supprimée.

La liste des occurrences, indices et gîtes en ETR identifiés au Québec est disponible en Annexe 1. De plus, la localisation des principales minéralisations en ETR est présentée à la Figure 6.





**Figure 6.** Localisation des principales minéralisations en ETR au Québec, dont 1- le gîte d'Eldor, 2- le gîte de Strange Lake, 3- le gîte de Misery Lake, 4- la propriété de Kwyjibo, 5- le gîte de Montviel, 6- le gîte du lac Shortt, 7- le gîte de Grande-Vallée, 8- l'indice Haltaparche, 9- le gîte de Kipawa, 10- l'indice Baie-Mercier, 11- l'indice Wares, et 12- la mine St-Lawrence Columbiun et le gîte Niocan.

## **Minéralisation primaire associée à des complexes de carbonatite**

### ***Description générale***

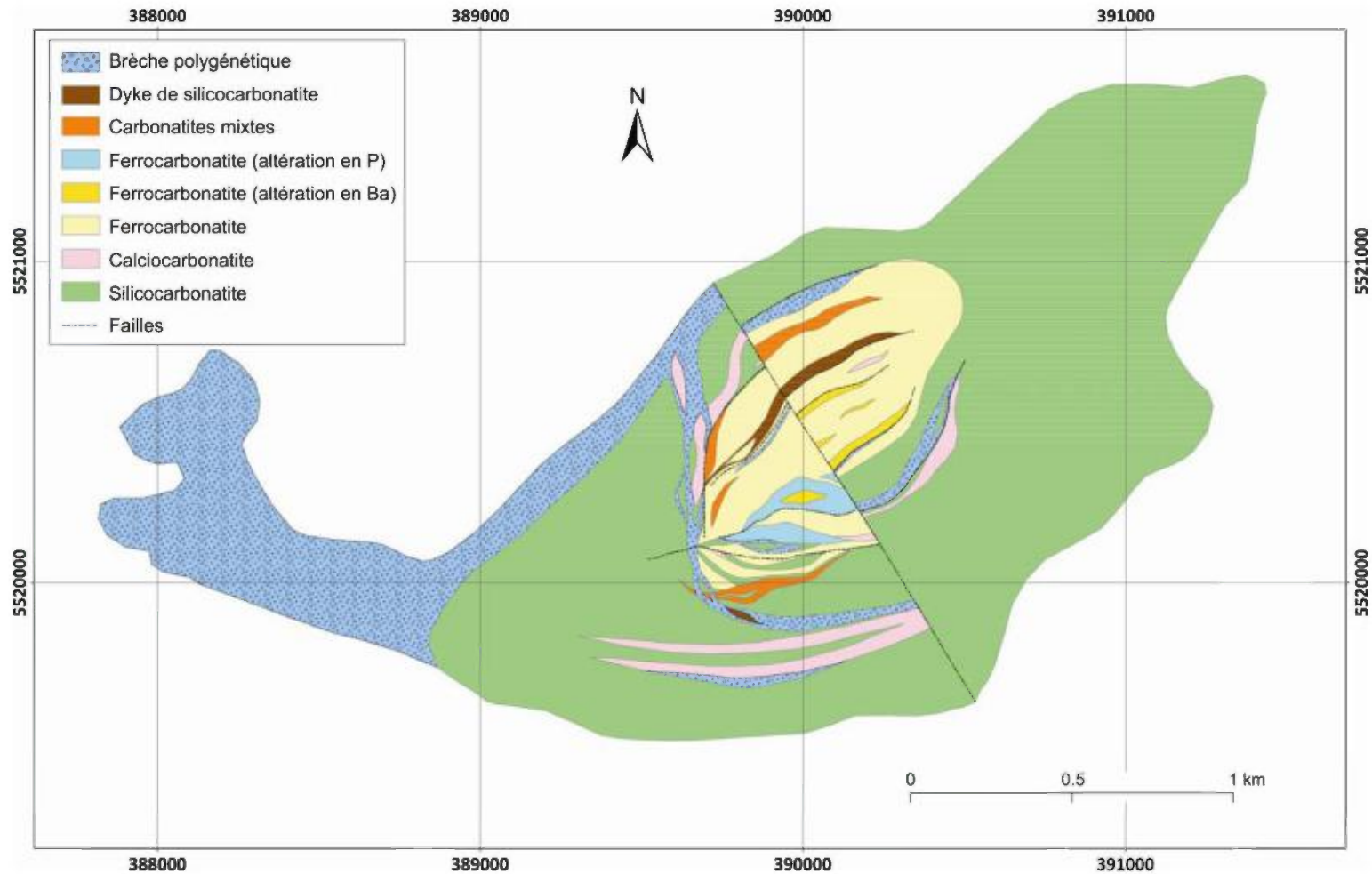
D'après l'Union Internationale des Sciences Géologiques (IUGS), les carbonatites sont des roches ignées, volcaniques et/ou intrusives, comprenant plus de 50 % de carbonate. Les principaux types incluent les carbonatites à calcite ou sövite, les carbonatites à dolomite ou beförsite et les carbonatites à ankérite ou rauhaugite. Les carbonatites sont communément associées à une variété de roches alcalines. La plupart d'entre elles semblent être polygénétiques puisqu'elles sont composées à la fois de minéraux d'origine magmatique et de cristaux résultant de la précipitation de fluides dérivés de magmas ou provenant de l'extérieur (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012).

L'origine des carbonatites est encore aujourd'hui l'objet de débat. Un petit nombre d'entre elles pourrait cristalliser à partir de magmas parents issus de la fusion partielle à très faible degré d'un manteau carbonaté (Gittins, 1989; Harmer et Gittins, 1998; Gittins et Harmer, 2003). D'autres seraient produites suite à la cristallisation fractionnée de magmas hyperalcalins d'origine mantellique (Veksler *et al.*, 1998; Mitchell, 2005) ou encore seraient le résultat de l'exsolution de liquides carbonatés immiscibles à partir de ces mêmes magmas (Le Bas, 1977; Kjarsgaard et Hamilton 1989; Lee et Wyllie, 1998).

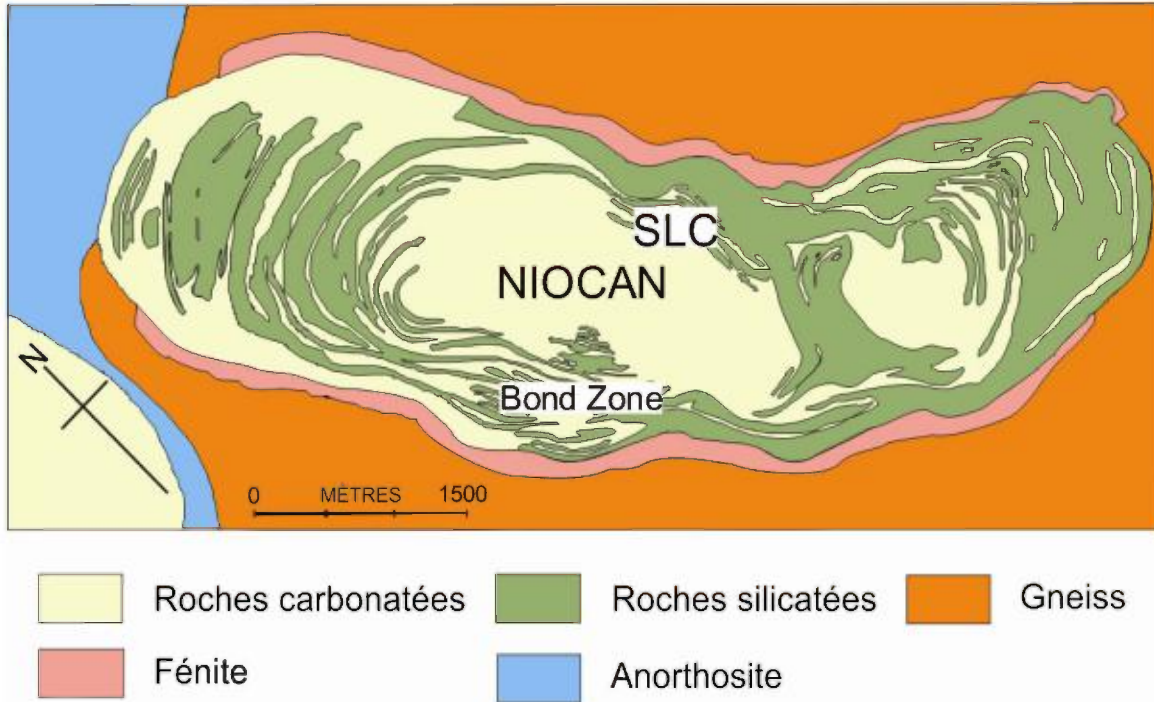
### ***Exemples au Québec***

Au Québec, les occurrences, indices et gîtes en ETR contenus dans les complexes de carbonatite renferment également Nb, Ta et P. Ils sont pour l'essentiel associés aux complexes de carbonatite situés le long des corridors structuraux de Waswanipi-Saguenay et d'Ottawa-Bonnechère (Fig. 6). Dans le premier corridor, on retrouve la mine Niobec (production totale de 1,8 Mt à 0,61 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; MRNF, 2010) associée au complexe de carbonatite de St-Honoré, le gisement Crevier (ressources indiquées de 12,9 Mt à 0,19 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 234 ppm Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et ressources présumées de 15,4 Mt à 0,17 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 252 ppm Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> à une teneur de coupure de 0,10 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Duplessis et Girard, 2010) associé à l'intrusion alcaline de Crevier, intrusion contenant des dykes de carbonatite (Groulier *et al.*, 2014), le gîte associé au complexe de carbonatite du lac

Shortt et le gisement associé au complexe de carbonatite de Montviel (ressources indiquées de 183,9 Mt à 1,46 % total des oxydes de terres rares (*TREO = total rare earth oxide*) et ressources présumées de 66,7 Mt à 1,46 % TREO à une teneur de coupure de 1,00 % TREO; Desharnais et Duplessis, 2011; Fig. 7). Il est à noter que dans les gisements Niobec et Crevier, les ETR sont des substances secondaires. Dans le second corridor, on retrouve l'ancienne mine St-Lawrence Columbiun (production de 6,2 Mt de minerai à 0,31 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre 1961 et 1976 et réserves estimées à 25,0 Mt avec 0,44 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Trudel, 1983; Lavergne, 1985) et le gisement de Niocan (ressources indiquées de 6,4 Mt à 0,65 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et ressources présumées de 3,2 Mt à 0,61 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> à une teneur de coupure de 0,40 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Niocan Inc., [www.niocan.com](http://www.niocan.com), mars 2015) tout deux associés au complexe de carbonatite d'Oka (Fig. 8). D'autres minéralisations ont également été identifiées plus au nord dans la Fosse du Labrador (Fig. 6), tel que les minéralisations associées au complexe de carbonatite d'Eldor, aussi nommé complexe de carbonatite du lac Lemoyne (ressources présumées de 117,3 Mt à 1,74 % TREO à une teneur de coupure de 1,25 % TREO; Laferrière, 2011).



**Figure 7.** Carte géologique du complexe de carbonatite de Montviel, sous le mort-terrain (~50m). Figure modifiée d'après Nadeau *et al.* (2015).



**Figure 8.** Carte géologique du complexe de carbonatite d’Oka et localisation des gîtes de Nb associés, incluant l’ancienne mine St-Lawrence Columbian (SLC), le gisement de Niocan et celui de Bond zone. Figure modifiée d’après Chen (2014).

### ***Contexte géologique***

Les complexes de carbonatite se mettent en place dans les environnements géodynamiques intracontinentaux en extension, tel que les environnements anorogéniques ou post-orogéniques en transtension. Ils sont communément associés à des structures continentales majeures (*e.g.*, zone de rift, zone de graben, ou linéament crustal). Les carbonatites peuvent former à la fois des complexes intrusifs composites en association avec les roches alcalines, des filons-couches, des dykes, ou des masses isolées de formes variées (circulaire, elliptique, irrégulière). Ces roches présentent de nombreuses évidences de remobilisation hydrothermale et métasomatique (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). L’altération métasomatique conduit à la mise en place d’un halo de roches sodiques et/ou potassiques, aussi appelées fenites autour des complexes de carbonatite, ainsi qu’à la formation de nombreuses veines et veinules riches en minéraux d’altération.

### ***Roches hôtes***

Les roches hôtes incluent la sövite, la rauhaugite, la beförsite, les roches intrusives à magnétite, olivine, apatite et localement phlogopite, la néphéline, la syénite, la pyroxénite, la péridotite et la phonolite.

### ***Minéralisation***

Dans les complexes de carbonatite, les minéralisations en ETR sont particulièrement riches en terres rares légères comparées aux terres rares lourdes (Linnen *et al.*, 2014). Elles sont également riches en éléments à fort potentiel ionique comme Nb et Ta, excepté dans le cas des carbonatites mises en place dans les environnements post-collision (Hou *et al.*, 2006; Chakhmouradian *et al.*, 2008). Les minéralisations en ETR, Nb, Ta et P peuvent être contenues dans des coulées de lave, des tuffs, des filons et des dykes de carbonatite (Jaireth *et al.*, 2014). Au contraire, les plutons volumineux et homogènes sont rarement minéralisés (Jaireth *et al.*, 2014). Dans l'ensemble, les ETR, Nb, Ta et P sont répartis entre les principaux minéraux composant les carbonatites, tel que la calcite, la dolomite, l'apatite et les amphiboles (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). Ils peuvent aussi être présents dans une grande variété de carbonate, phosphate, oxydes et silicates riches en ETR (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). Au Québec, les minéraux exploités sont pour l'essentiel le pyrochlore-(Nb), l'apatite-(P), la bastnäsite-(La) et la bastnäsite-(Ce).

### ***Âge de la minéralisation***

Les minéralisations associées aux complexes de carbonatite se mettent en place de l'Archéen au Cénozoïque. Les complexes de carbonatite du lac Shortt et de Montviel se sont formés il y a 2652 Ma (Thorpe *et al.*, 1984; Morasse, 1988) et 1894 Ma (David *et al.*, 2006), respectivement. Le complexe de carbonatite d'Eldor s'est mis en place il y a environ 1874 Ma (Wright *et al.*, 1998). Au contraire, l'intrusion alcaline de Crevier a été datée à 957,5 Ma (Groulier *et al.*, 2014), le complexe de carbonatite de St-Honoré semble s'être mis en place aux environs de 565 Ma (Doig et Barton, 1968) et le complexe de carbonatite d'Oka a été formé entre 135 et 113 Ma (Chen, 2014).

### ***Origine de la minéralisation***

La minéralisation en ETR dans les complexes de carbonatite peut avoir plusieurs origines. La minéralisation d'origine magmatique est associée aux processus de cristallisation fractionnée ou à l'immiscibilité des fluides magmatiques. La majorité des ETR est alors incorporée dans des minéraux tels que l'apatite et la calcite. La minéralisation d'origine hydrothermale est par exemple associée à la mise en place de veines de fluorine et de barite. La minéralisation d'origine hydrothermale et métasomatique est reliée à la silicification, aux dépôts de minéraux riches en Th-U, à la mise en place de veines de calcite et à la reprécipitation de l'hématite. La minéralisation résiduelle est issue de l'altération et de l'érosion des complexes de carbonatite et conduit à l'accumulation de pyrochlore, d'anastase et d'apatite. Dans la plupart des minéralisations associées à des processus supergènes, il est difficile de déterminer si les minéraux contenant des ETR sont formés initialement par cristallisation fractionnée de magma ou par précipitation à partir de fluides hydrothermaux (Wall et Mariano, 1996).

### **Minéralisation primaire associée aux roches ignées peralcalines**

#### ***Description générale***

Les roches ignées peralcalines sont caractérisées par un excès molaire en Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O par rapport à Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ces roches sont facilement reconnaissables à la présence de clinopyroxène sodique (*e.g.*, aégyrine) et d'amphibole sodique (*e.g.*, riébeckite), et à l'absence commune de minéraux alumineux (*e.g.*, biotite) (Richardson et Birkett, 1996). Elles incluent les granites et syénites sursaturés en silice, ainsi que les roches felsiques sous-saturées en silice qui contiennent des feldspathoïdes (Richardson et Birkett, 1996). Dans de nombreux cas, les intrusions peralcalines sont associées spatialement à des intrusions peralumineuses (Jaireth *et al.*, 2014). Les roches ignées peralcalines appartiennent au groupe des roches intrusives anorogéniques (type A).

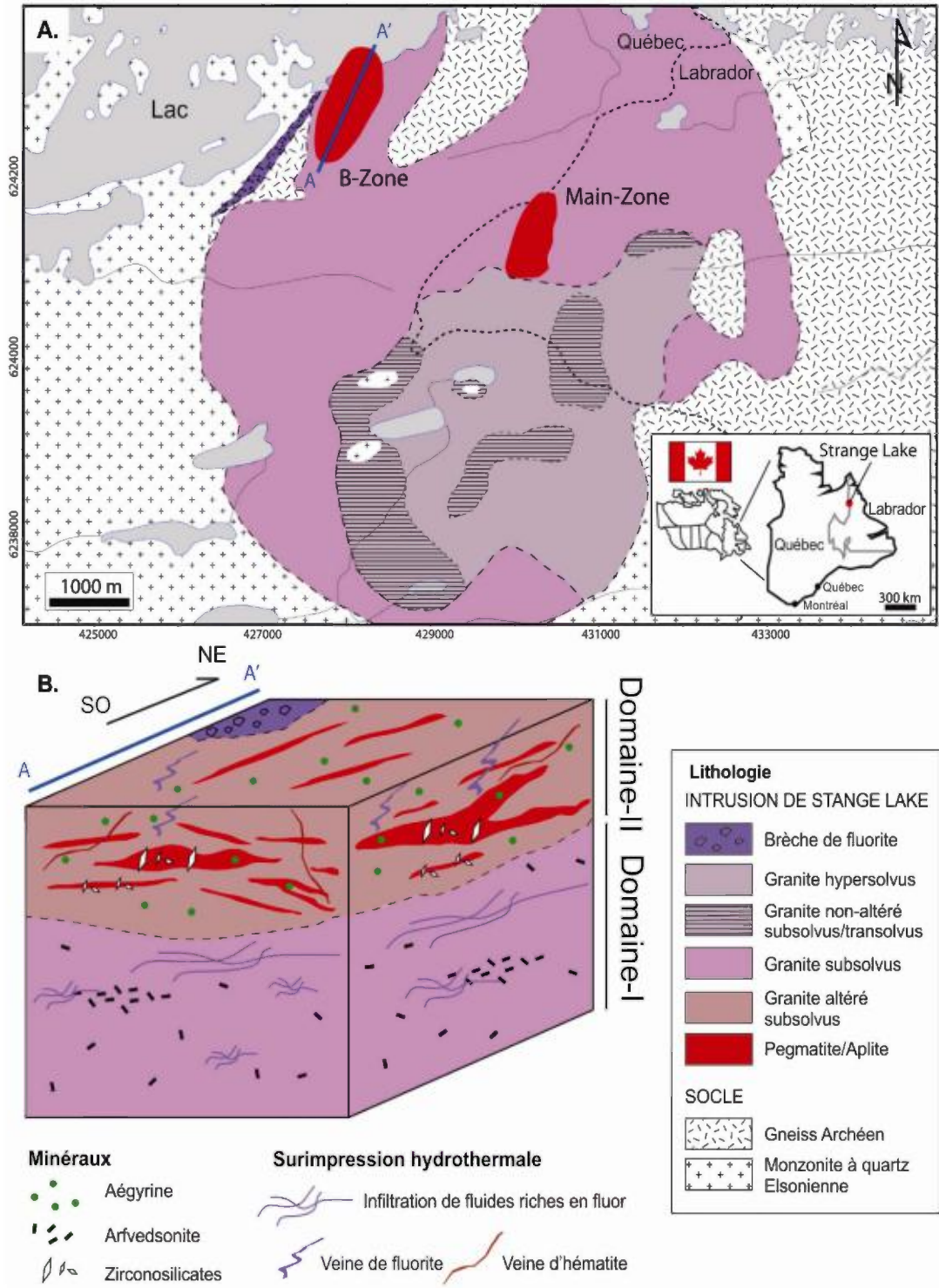
Les roches ignées peralcalines sont produites, soit 1) par la cristallisation fractionnée de magmas basaltiques alcalins, riches en volatiles (*e.g.*, F et H<sub>2</sub>O) et en éléments incompatibles (*e.g.*, Zr, Hf, Nb, Ta, Be et ETR), qui sont issus d'un très faible degré de fusion partielle du manteau (Jaireth *et al.*, 2014; Mungall, 2014), soit 2) par la

fusion partielle d'une croûte résiduelle formée suite à l'extraction de magma felsique. Cette fusion crustale anhydre à haute température conduit à la destruction de l'amphibole résiduelle, de la biotite et des minéraux accessoires tel que le zircon et à l'enrichissement des magmas en halogènes et en éléments à fort potentiel ionique (Collins *et al.*, 1982). Plusieurs auteurs (*e.g.*, Martin et DeVito, 2005) avancent que cette croûte résiduelle aurait été préalablement métasomatisée par des fluides/magmas d'origine mantellique riches en halogènes et en métaux rares. Ainsi, l'introduction du fluor dans les magmas conduit à leur dépolymérisation, à la réduction de la température du solidus et à la formation de complexes alcalins ioniques avec les ETR et les éléments à fort potentiel ionique. Ceci retarde la cristallisation des minéraux contenant des ETR et conduit à une cristallisation fractionnée extrême et à un enrichissement des magmas/fluides résiduels en métaux rares.

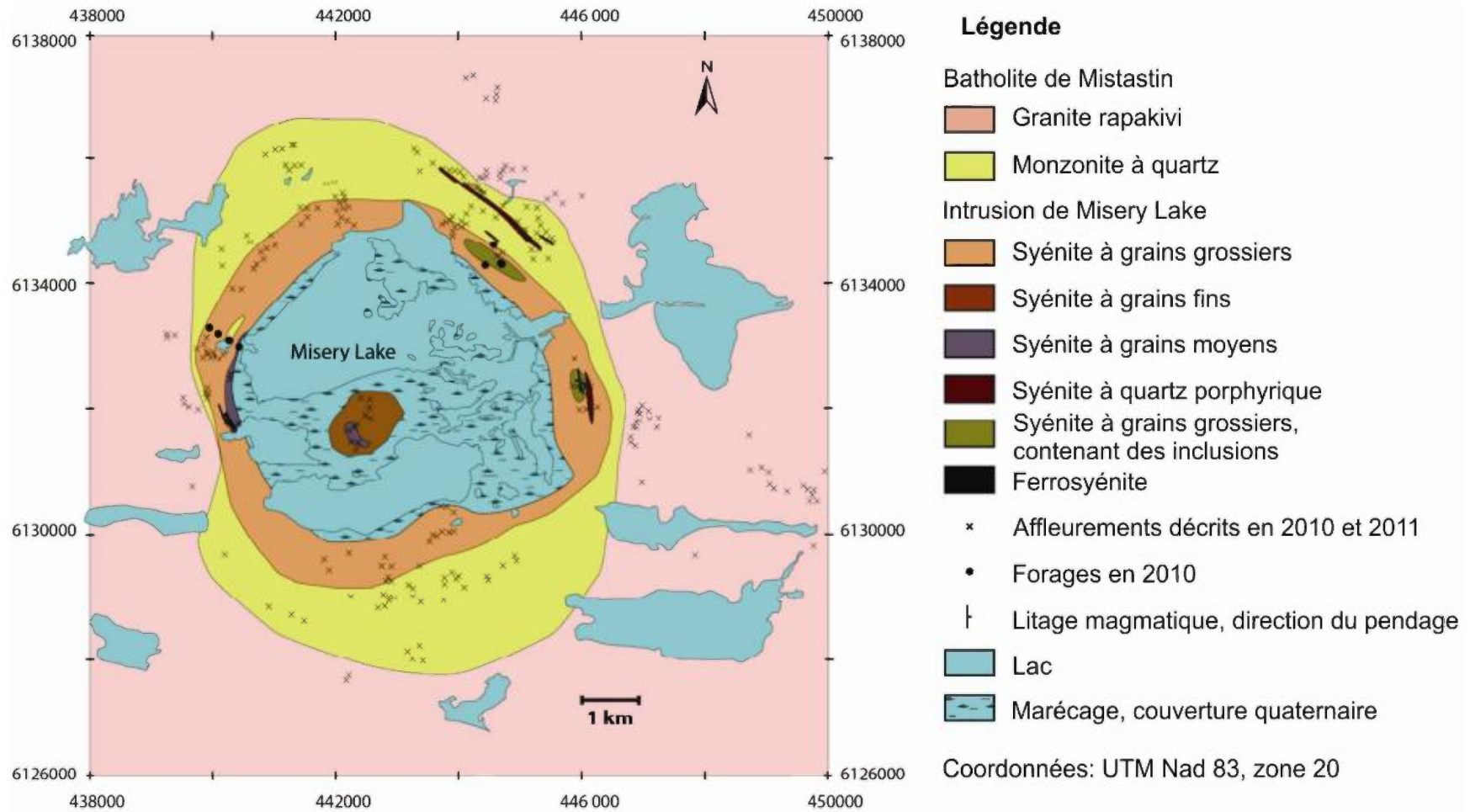
### ***Exemples au Québec***

Au Québec, les occurrences minéralisées en ETR associées aux complexes hyperalcalins sont également riches en Zr et F, avec localement Be, Nb et Th. Elles ont essentiellement été identifiées dans les Provinces de Churchill et de Grenville (Fig. 6). Les plus importantes comprennent les gîtes d'ETR-Zr-Nb de Strange Lake, aussi nommé gîte du lac Brisson, (Fig. 9) et de Misery Lake (Fig. 10), tous deux situés dans la Province de Churchill, et le gîte d'ETR-Zr de Kipawa (Fig. 11) dans la Province de Grenville. La zone minéralisée « B-Zone » contenue dans le pluton granitique de Stange Lake contient des ressources indiquées de 278,1 Mt à 1,92 % ZrO<sub>2</sub>, 0,93 % TREO et 0,18 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et des ressources présumées de 214,4 Mt à 1,71 % ZrO<sub>2</sub>, 0,85 % TREO et 0,14 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> à une teneur de coupure de 0,50 % TREO (Quest Rare Minerals Ltd., [www.questrareminerals.com](http://www.questrareminerals.com), mars 2015). L'indice contenu dans l'intrusion de syénite à fayalite de Misery Lake contient jusqu'à 8,56 % TREO, 3,05 % ZrO<sub>2</sub> et 0,72 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Petrella, 2012). Enfin, le gîte de Kipawa contient des ressources indiquées de 13,4 Mt à 0,36 % TREO et des ressources présumées de 3,3 Mt à 0,31 % TREO à une teneur de coupure de 0,20 % TREO (Saucier *et al.*, 2013).

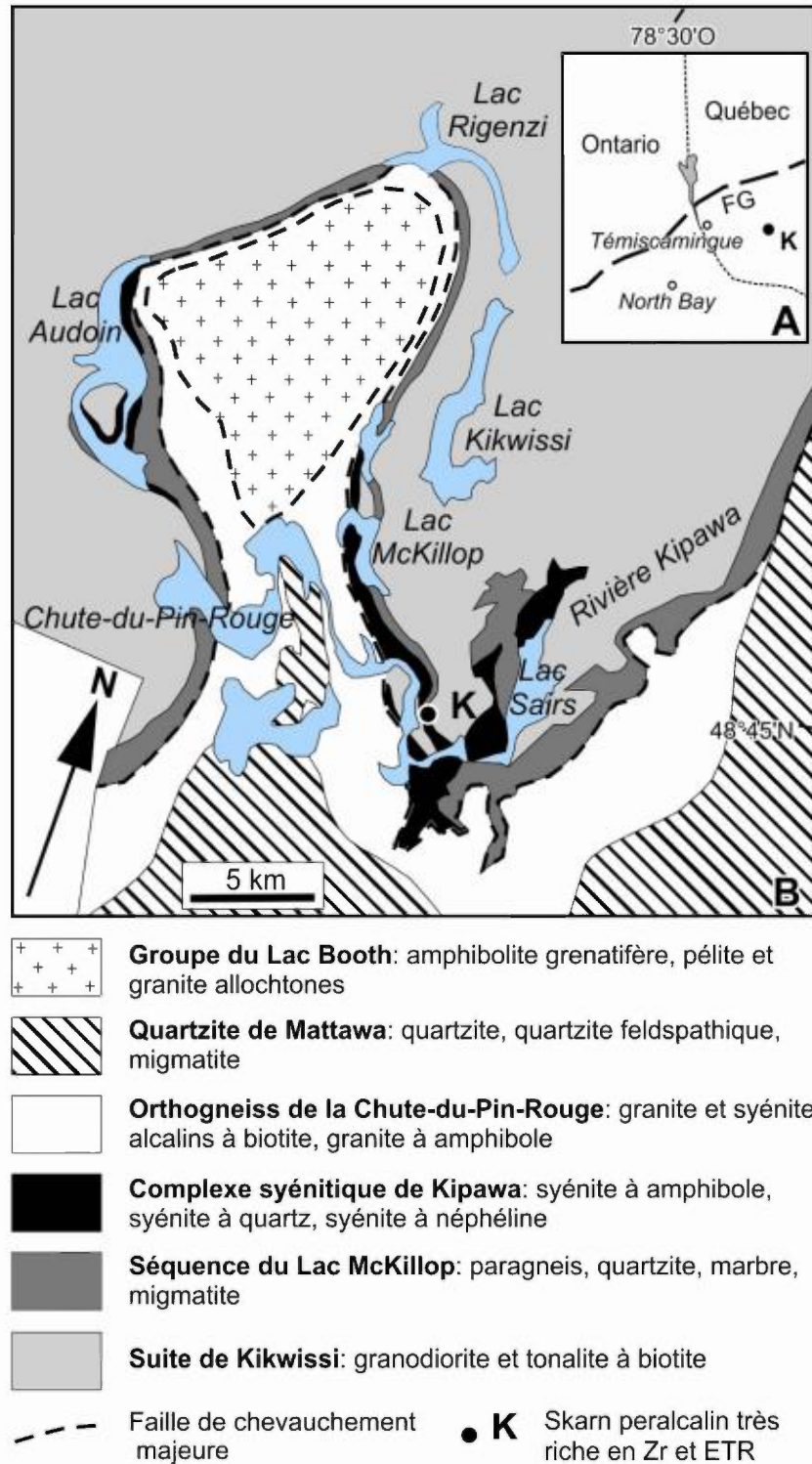




**Figure 9.** A. Carte géologique de l'intrusion granitique peralkaline de Strange Lake. B. Bloc modèle schématisé de la « B-Zone ». Figure modifiée d'après Gysi et Williams-Jones (2013).



**Figure 10.** Carte géologique de l'intrusion syénitique peralcaline de Misery Lake. Figure modifiée d'après Petrella (2012).



**Figure 11. A.** Carte de localisation du front du Grenville (FG) dans la région de Kipawa. **B.** Carte géologique simplifiée de la région de Kipawa. Figure modifiée d'après van Breemen et Currie (2004).

### ***Contexte géologique***

Les roches ignées peralcalines se mettent en place dans les zones d'extension continentale, anorogénique, en association avec des structures crustales majeures, tel que les rifts et les grabens. Elles forment des complexes intrusifs annulaires, des pegmatites, ou des corps massifs subvolcaniques. L'altération de ces corps intrusifs est très fréquente. Celle-ci inclut l'albitisation du sommet des intrusions, l'altération par des fluides d'origine magmatique qui cause le lessivage des roches granitiques en F et la déstabilisation et l'hématitisation des amphiboles et des feldspaths, l'altération par des fluides météoriques riches en Ca de plus basses températures qui conduit au remplacement pseudomorphique des silicates sodiques par des silicates calciques, et la silicification.

### ***Roches hôtes***

Les complexes intrusifs hôtes de la minéralisation comprennent des syénites à augite et néphéline, des granites hyperalcalins à aégyrine, arvfedsonite, riébeckite et sodalite, des naujaïtes, des foyaites, des lujavrites, des kakortokites et des monzo-granites à biotite. Les pegmatites hyperalcalines sursaturées en silice contiennent du quartz, de la perthite, de l'albite, de l'orthose, de l'aégyrine, de la riébeckite et de la fluorine. Les pegmatites hyperalcalines sous-saturées en silice contiennent de la néphéline. Les corps subvolcaniques incluent des trachytes, des commendites, des pantellerites, des hawaiiïtes et des phonolites.

### ***Minéralisation***

Les minéralisations en ETR-Zr-F±Be±Nb±Th associées aux roches ignées peralcalines sont généralement caractérisées par de gros tonnages avec de faibles teneurs en métaux. De plus, elles sont typiquement enrichies en terres rares lourdes et en éléments à fort potentiel ionique (*e.g.*, Zr et Nb) (Castor et Hedrick, 2006). Les occurrences minéralisées se retrouvent principalement dans les pegmatites ou masses granitiques à syénitiques hyperalcalines qui cristallisent dans la coupole des complexes intrusifs peralcalins. À l'échelle de l'intrusion, les pegmatites minéralisées se rencontrent dans les fractures (généralement annulaires), les joints et les diaclases. La minéralisation peut également être observée au contact intrusion-éponte et au contact entre deux unités intrusives, ou bien être disséminée au sommet des intrusions, dans la portion albitisée, suite à des processus magmatiques ou hydrothermaux. Dans l'ensemble, le

minerai d'ETR, Zr, F, Be, Nb et Th inclut le zircon, la monazite, le pyrochlore, la bastnaésite, le béryl, l'eudyalite, la gittinsite, la thorite, la tantalite, la hiortdahlite, l'armstrongite, l'elpidite, l'ilarite, la bertrandite, l'ytthrofluorite, la gagarinite, la britholite, la kainosite, la mosandrite et la gadolinite.

### ***Âge de la minéralisation***

Les occurrences, indices et gîtes en ETR associés aux complexes hyperalcalins sont protérozoïques à cénozoïques. En particulier, les intrusions contenant les gîtes de Misery Lake, Strange Lake et Kipawa ont été datées à 1410 Ma (David *et al.*, 2012), 1240 Ma (Miller *et al.*, 1997) et 1033 Ma (van Breemen et Currie, 2004) respectivement.

### ***Origine de la minéralisation***

La minéralisation en ETR-Zr-F±Be±Nb±Th dans les intrusions peralcalines peut être d'origine ignée et/ou hydrothermale. La cristallisation fractionnée conduit à la concentration des ETR dans des pegmatites ou à la formation de lits riches en minéraux de terres rares dans des séquences de cumulat (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). Les processus hydrothermaux incluent des fluides tardifs qui métasomatisent les roches hyperalcalines parents et les pegmatites (albitisation, hématitisation et silicification) et précipitent des minéraux riches en ETR (*e.g.*, bastnaésite et fluorine). La remobilisation hydrothermale semble être indispensable à la formation de gîte économique en ETR (Linnen *et al.*, 2014).

## **Minéralisation primaire associée à des indices d'oxydes de fer, cuivre, or et ETR de types Kiruna/ Olympic Dam**

### ***Description générale***

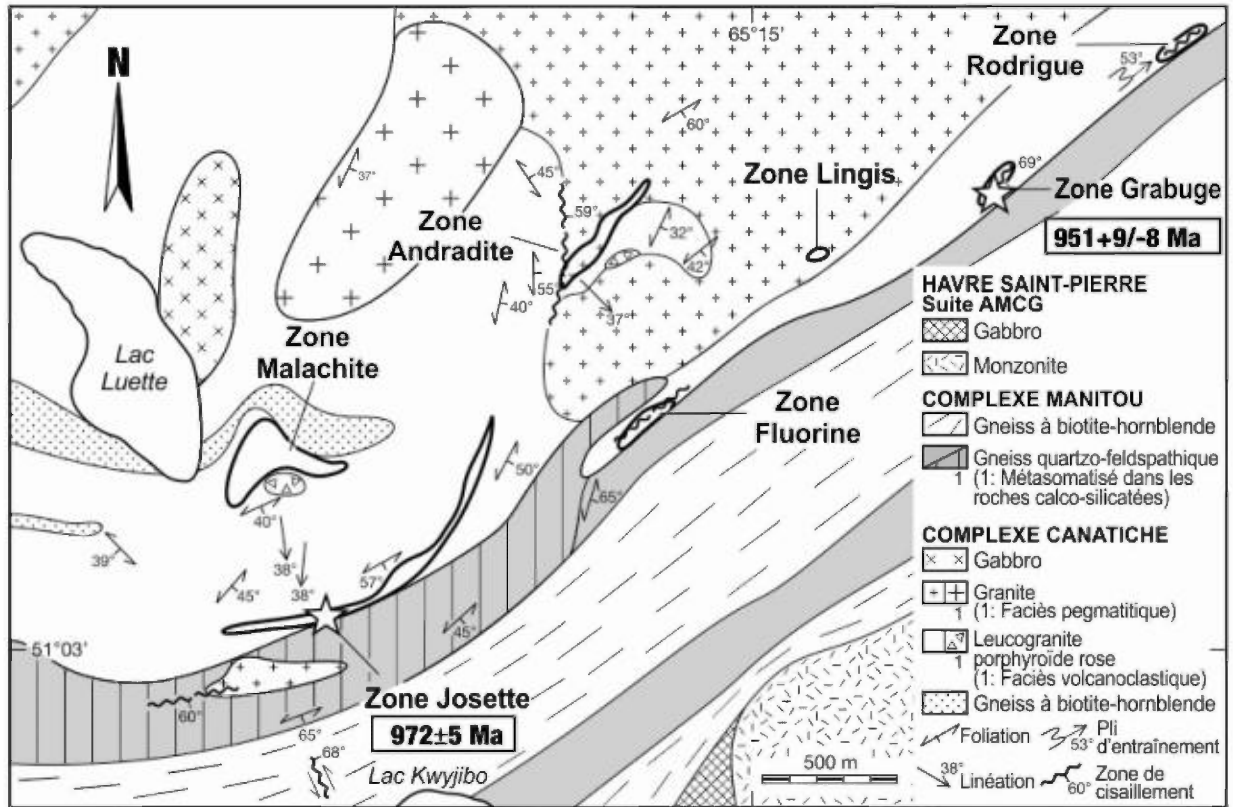
Les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au comprennent un large éventail de minerais monominéraliques à polyminéraliques, pauvres en sulfures, incluant plus de 20 % de magnétite pauvre en Ti et/ou d'hématite, et se présentant sous forme de brèches, de veines, de minéralisations disséminées, et de lentilles massives (Corriveau, 2007). Ces gîtes d'origine hydrothermale se mettent en place dans un large éventail de roches hôtes (Williams *et al.*, 2005). La plupart sont associés à des suites intrusives granitiques anorogéniques (type A) ou ignées

(type I), qui présentent des faciès mafiques et intermédiaires, ainsi qu'à des stocks de roches alcalines et de carbonatite (Corriveau, 2007).

Les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont subdivisés en plusieurs sous-types, incluant le sous-type Kiruna, nommé d'après le nom du gisement Kiruna en Suède, et le sous-type Olympic Dam, nommé d'après le gisement du même nom situé en Australie. Le premier sous-type comprend des gîtes monométalliques (Fe±P) contenant des magnétites pauvres en Ti-V et de l'apatite avec peu ou pas de cuivre et d'or (Hitzman, 2002). Le second sous-type inclut des gîtes contenus dans des brèches dans lesquels le minerai polymétallique (Fe±Cu±U±Au±ETR) est spatialement et temporellement associé avec l'altération des oxydes de fer (Hitzman, 2002; Skirrow *et al.*, 2002).

### *Exemples au Québec*

Les minéralisations en Fe, Cu, ETR, P, F, Au et Ag associées aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont rares au Québec et se concentrent pour l'essentiel dans la région de Manitou, dans la Province de Grenville (Fig. 6). La plus importante d'entre elles est associée à la propriété de Kwyjibo (Fig. 12), dont le meilleur intervalle présente des teneurs de 7,04 % TREO et de 0,19 % Cu sur 7.0 m (Focus Graphite, [www.focusgraphite.com](http://www.focusgraphite.com), mars 2013).



**Figure 12.** Carte géologique de la propriété Kwyjibo. Figure modifiée d'après Gauthier *et al.* (2004).

### Contexte géologique

Les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont associés à des grabens et des rifts formés dans les environnements continentaux en extension, tel que les contextes intracratoniques, intra-arcs ou arrière-arcs, et les environnements tardi-orogéniques ou postorogéniques (Corriveau, 2007). Ces structures crustales sont contemporaines à la mise en place des roches volcaniques hôtes dans la croûte supérieure. Les gîtes forment des masses discordantes, des veines, des dykes, des corps tabulaires et des stockwerks. Les veines et les zones tabulaires peuvent s'étendre latéralement sur plusieurs kilomètres et verticalement sur plusieurs centaines de mètres. Les gisements de ce type se mettent en place le long de failles et/ou des contacts géologiques. Les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont très fréquemment altérés en raison de la forte activité hydrothermale dans les failles associées à la bréchification. Ils sont communément entourés par des zones d'altération sodique-calcique à l'échelle régionale et par des zones d'altération potassique et à oxydes de fer à l'échelle locale (Corriveau, 2007). Dans le cas des gîtes du sous-type Kiruna, l'altération

comprend la formation de scapolite et d'albite, et la présence d'actinolite et d'épidote dans les épointes mafiques. Dans le cas des gîtes du sous-type Olympic Dam, l'altération est plus diversifiée et très intense avec la formation de séricite et d'hématite en surface et l'apparition de chlorite et de feldspath potassique en profondeur.

### ***Roches hôtes***

Les zones de brèche et les veines sont encaissées dans des différents types de roches volcaniques (*e.g.*, brèche volcanique felsique, tuf), intrusives (*e.g.*, granite) et/ou sédimentaires (*e.g.*, roche sédimentaire clastique). Les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont également souvent associés à des suites alcalines felsiques de type A, dont des granites, des mangérites et des charmockites, ainsi que leurs équivalents volcaniques. Dans plusieurs cas, la magnétite ou l'hématite forme la matrice de brèches hétéroclites.

### ***Minéralisation***

Dans les gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au, les ETR sont le plus souvent exploités comme sous-produit lors de l'extraction des oxydes de fer ou de l'apatite (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). Les occurrences minéralisées forment des masses, des veines et des zones de brèche disséminées à massives. Le minerai de Fe, Cu, P, F, Au et Ag comprend de la magnétite/hématite, de l'apatite, de l'actinolite, et des pyroxènes dans le type Kiruna, avec des teneurs variables en sulfures de Cu, Au et Ag. Le minerai d'ETR comprend de l'allanite, de l'apatite, de la britholite, de la kainosite, de l'andradite, de la bastnaésite, de la gadolinite, de la monazite, de la perovskite, du pyrochlore, de la thorite, de l'uraninite et du xénotime.

### ***Âge de la minéralisation***

Les minéralisations en ETR associées aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au sont protérozoïques à cénozoïques. Celles identifiées sur la propriété de Kwyjibo semblent avoir été mises en place entre 972 Ma et 951 Ma, approximativement (Gauthier *et al.*, 2004).

### ***Origine de la minéralisation***

La mise en place de ces minéralisations est encore incertaine. D'après Williams *et al.* (2005), la formation des gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au impliquerait des saumûres ayant une



composition chimique complexe qui incluent généralement une composante carbonique. Toutefois, la source de l'eau, du CO<sub>2</sub>, des métaux, du soufre et de la salinité de ces saumûres semble être différente d'un gîte à l'autre. Les saumûres et les métaux pourraient provenir directement de magmas, indirectement de l'interaction entre des fluides magmatiques et les roches encaissantes ou d'autres fluides, ou encore indirectement suite à la modification de fluides de bassin ou de fluides métamorphiques. Ces auteurs indiquent que le dépôt du minerai résulterait principalement des interactions entre un grand volume de fluide et les roches encaissantes, ainsi que du refroidissement de ces mêmes roches. Cependant, ils mentionnent également le rôle primordial joué par le mélange au site de dépôt de saumûres riches en métaux et pauvres en S avec des fluides contenant du S, bien que les fluides impliqués ne soient pas encore caractérisés avec précision.

## **Minéralisation primaire sans association avec des roches ignées alcalines**

### ***Description générale***

Les gîtes sans association avec les roches ignées alcalines incluent des pegmatites granitiques, des granites et des migmatites hyperalumineux à métalumineux (caractérisés par un excès molaire en Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et CaO par rapport à Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ainsi que des skarns.

Les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites seraient dérivés de liquides magmatiques granitiques, pauvres en phosphore, métalumineux à peralumineux de type igné (I) ou anorogénique (A), ou de liquides magmatiques granitiques, riches en phosphore, peralumineux et issus de la fusion partielle de roches métasédimentaires, soit de type sédiment (S) (Linnen *et al.*, 2014). La cristallisation fractionnée extrême de ces magmas aurait généré des concentrations élevées en ETR dans les liquides résiduels (Linnen *et al.*, 2012).

Les skarns sont des roches calco-silicatées métasomatisées, calciques et magnésiennes, communément, mais pas toujours, situées au contact d'intrusions granitiques et d'essaims de dyke de pegmatite granitique métalumineux à peralumineux. Ils se forment suite à l'altération de roches carbonatées, généralement poreuses ou fracturées, par métamorphisme régional ou de contact et par métasomatisme de remplacement à partir de fluides d'origine magmatique, métamorphique, météorique et/ou marine. Les skarns de réaction peuvent se former suite au métamorphisme isochimique d'unités de shale et de carbonate finement interlitées. Dans ces

derniers, le transfert des composants entre les différentes lithologies s'effectue à l'échelle locale, sans apport externe.

### ***Exemples au Québec***

Au Québec, les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites hyperalumineux à métalumineux contiennent des minéralisations en U, Th et localement ETR-Nb-Zr, alors que les skarns peuvent contenir des minéralisations en Th, U avec localement Mo-ETR. Ces occurrences minéralisées sont pour l'essentiel situées dans la Province de Grenville (Fig.6), tel que l'indice Haltaparche contenu dans une pegmatite granitique (MERN, 2014) et l'indice Baie-Mercier principalement associé à un horizon de carbonatite (Lapointe *et al.*, 1993). L'indice Haltaparche présente des teneurs de 3950 ppm Ce, 2040 ppm La et 1520 ppm Nd (fiche de gîte, MERN, 2015). L'indice Baie-Mercier présente quant à lui des teneurs de 2800 ppm Ce, 1200 ppm La et 810 ppm Nd (Lapointe *et al.*, 1993). Quelques indices ont également été découverts dans la Province du Supérieur et dans la Province de Churchill dans le secteur de la Fosse du Labrador (Fig. 6).

### ***Contexte géologique***

Les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites sont syn- à tardi-tectoniques. Ils se mettent en place dans les environnements orogéniques continentaux, lors d'épisode de métamorphisme de haut grade et d'anatexie crustale. Cette dernière résulte de l'épaississement crustal qui fait suite à la collision continentale ou au sous-plaquage de magmas mafiques d'origine mantellique à la base de la croûte continentale. Certaines pegmatites dérivent directement de l'anatexie et se mettent en place *in situ*. D'autres sont formées suite à la différenciation magmatique des granitoïdes. Les pegmatites granitiques forment des essaims de dykes homogènes à grossièrement zonés, d'épaisseur métrique à décamétrique et pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. Ils s'injectent dans les fractures dans, ou à proximité, des intrusions felsiques et dans les fractures et les plans de schistosité situés dans les roches hôtes. Les granites et les migmatites granitiques constituent des masses hétérogènes qui se mettent en place dans les plans de foliation métamorphique et au contact entre les différentes lithologies. Les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites peuvent être affectés par le métasomatisme qui conduit à l'albitisation, la chloritisation, l'oxydation et l'hydratation.

Les skarns se mettent en place dans les environnements orogéniques avec des intrusions felsiques injectées dans des roches sédimentaires calcaires (Jaireth *et al.*, 2014). Ils forment des zones irrégulières le long des contacts intrusifs. Dans les skarns, les cornéennes, produites par le métamorphisme de contact, sont couramment remplacées par des silicates de calcium, de fer et de magnésium anhydres ou hydratés (Jaireth *et al.*, 2014).

### ***Roches hôtes***

Les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites peuvent également être associés à d'autres roches intrusives felsiques à intermédiaires, des roches métavolcaniques, des méta-grauwackes, des orthogneiss, des paragneiss et des roches calco-silicatées.

Les skarns peuvent être associés à des pegmatites granitiques, des granites, des syénites, des pyroxénites, des gneiss calco-silicatés et des marbres.

### ***Minéralisation***

Les occurrences minéralisées contenues dans les pegmatites, les granites et les migmatites hyperalumineux à métalumineux sont caractérisées par de faible tonnage et par des concentrations relativement faibles en minéraux contenant des ETR (Chakhmouradian et Zaitsev, 2012). La minéralisation est disséminée dans les granites ou le long de joints et de fractures. Les minéraux exploités pour les ETR, U, Th, Nb et Zr incluent la monazite, le xénotime, l'allanite, le zircon, l'uraninite, la pechblende, la thorianite, le pyrochlore, la samarskite, la coffinite, l'uranophane, la fergusonite, la chevnickite, la gadolinite et la ferrocolumbite.

Dans les skarns, la minéralisation est contenue dans les roches calcaires et calco-silicatées formant des auréoles thermiques en bordure des intrusions. Le minerai d'ETR, Th et U comprend l'uraninite, la monazite, le xénotime, l'allanite, le zircon, la pechblende, la thorianite, le pyrochlore. Ces skarns peuvent aussi contenir de la molybdénite de laquelle est extrait Mo.

### ***Âge de la minéralisation***

Les pegmatites granitiques, les granites, les migmatites et les skarns contenant des ETR sont essentiellement archéens à protérozoïques (*e.g.*, indice Lac Turgeon daté à environ 961 Ma; Brodie, 2008) et plus rarement mésozoïques à cénozoïques.

### ***Origine de la minéralisation***

La minéralisation dans les pegmatites granitiques, les granites et les migmatites hyperalumineux à métalumineux est essentiellement d'origine magmatique. Cependant, les métaux sont communément remobilisés et concentrés lors du métamorphisme et de l'altération hydrothermale.

Dans les skarns, la minéralisation est formée à partir de fluides métasomatiques et/ou de fluides métamorphiques qui pénètrent et réagissent avec la roche calcaire en introduisant de l'alumine, de la silice, du magnésium, ainsi que des ETR et Mo. Dans certains cas, la minéralisation peut être remobilisée par des fluides métamorphiques tardifs formés lors du métamorphisme régional ou par le lessivage (Jaireth *et al.*, 2014). Les concentrations économiques de minerai sont généralement mises en place lors des derniers stades de refroidissement des fluides (Meinert, 1993; Eckstrand *et al.*, 1996).

### **Minéralisation secondaire dans les placers et paléoplacers**

#### ***Description générale***

Les gîtes de type placer et paléoplacer se forment suite à la concentration de minéraux lourds résistants à l'altération chimique et à l'abrasion mécanique (*e.g.*, ilménite, rutile, cassitérite, monazite, zircon et béryl) dans des dépôts fluviatiles, glaciaires, fluvio-glaciaires, de plage, de fond marin soulevé, de dune et de cône alluvial. Ces minéraux détritiques sont issus de l'altération et du lessivage de sources primaires très variées (*e.g.*, roches ignées, roches de haute grade métamorphique).

Les placers fluviatiles se forment dans des irrégularités à la base des chenaux de rivière, dans des dépressions dans le socle, et dans des fractures, des joints, des clivages et des failles. Les placers glaciaires et fluvio-glaciaires sont limités aux régions où les glaciers et les eaux de fonte auraient érodé des placers préexistants. Les placers d'origine marine (*e.g.*, de plage, de fond marin, de dune) se mettent en place le long ou à proximité des côtes dans des pièges topographiques. Les minéraux lourds sont alors transportés et concentrés par l'action des vagues, des courants côtiers, des marées et localement du vent. Les cônes alluviaux et deltaïques sont dominés par les dépôts de sable massif ou granoclassé et s'accumulent dans les pentes abruptes au-dessus de zones érodées.

### ***Exemples au Québec***

Au Québec, les indices d'ETR dans les placers et paléoplacers peuvent également inclure Fe, Ti, Cu, Zn, Zr et Th. Les plus importants sont situés dans la Fosse de l'Ungava et la Province des Appalaches (Fig. 6). Parmi ces indices, celui de Wares est composé de minéraux lourds (*e.g.*, magnétite titanifère, rutile, zircon, monazite) contenus dans une subarkose qui sont issus de l'altération du socle précambrien et/ou de la désagrégation des roches volcaniques alcalines situées à proximité (Gauthier *et al.*, 1989). Cet indice présente des teneurs de 1540 ppm Ce, 917 ppm La et 568 ppm Nd (fiche de gîte, MERN, 2015). On retrouve également plusieurs paléoplacers, riches en Fe et Ti, qui contiennent de faible teneur en ETR sur les plages de la Basse-Côte-Nord, le long du fleuve St-Laurent, et en bordure des cours d'eau et des lacs dans des sables pléistocènes (*e.g.*, gîte de Natashquan).

### ***Contexte géologique***

Les placers et paléoplacers contenant des minéralisations en ETR sont mis en place à l'intérieur ou en marge des cratons stables riches en sédiments clastiques remaniés et/ou à proximité des arcs volcaniques mésozoïques à cénozoïques. Les dépôts d'origine continentale forment des lentilles peu épaisses (<2 m) avec une extension latérale variable et sont souvent discontinus. Les dépôts d'origine marine mis en place le long des côtes, sont peu épais (<1 m), allongés (>100 m) et présentent une faible extension latérale (<50 m).

### ***Dépôts hôtes***

Les dépôts d'origine continentale comprennent des sables à grains fins à grossiers, granoclassés et arrondis. Les dépôts d'origine marine sont constitués de sable à grains moyens à grossiers, granoclassés, recouvrant des sables beaucoup plus fins et mis en place à plus faible profondeur.

### ***Minéralisation***

Par le passé, les placers et paléoplacers comptaient pour une part importante dans l'extraction des ETR. Cependant, de nos jours, très peu de ces métaux sont encore issus de ces gîtes, en particulier en raison de leur contenu élevé en Th et U et de leur forte radioactivité et en raison de l'absence de concentration majeure en minéraux porteurs des ETR (Castor et Hedrick,

2006). L'exploitation des ETR contenus dans les placers et paléoplacers ne devient économique qu'avec l'exploitation d'autres minéraux présents en plus grande quantité tel que l'ilménite pour Ti et le zircon pour Zr (Castor et Hedrick, 2006). Les minéraux lourds retrouvés dans ces dépôts sont essentiellement concentrés dans des pièges topographiques, dans des pièges structuraux, et dans des zones de variation du niveau ou du débit des eaux. Au Québec, ils incluent la magnétite, l'ilménite, le zircon, la cassitérite, la monazite et le grenat.

### ***Âge de la minéralisation***

Les placers et paléoplacers contenant des minéralisations en ETR sont paléozoïques à cénozoïques. Plus spécifiquement, ceux mis en place dans les zones glaciaires sont d'âges tardi-pléistocènes à holocènes alors que les autres sont d'âge cambrien (*e.g.*, indice de Wares; Gauthier *et al.*, 1989) à pléistocène (*e.g.*, gîte de Natashquan; Dugas, 1952).

### ***Origine de la minéralisation***

Les ETR dans les placers et paléoplacers sont associés à la monazite et, plus rarement, à d'autres minéraux contenant des ETR (Walters *et al.*, 2011). Tous ces minéraux proviennent de l'érosion de la plupart des roches ignées et métamorphiques et des roches sédimentaires anciennes.

## **Minéralisation secondaire dans des argiles à adsorption ionique**

### ***Description générale***

Les argiles sont des phyllosilicates omniprésents dans les sols, les formations superficielles et les roches sédimentaires. Leur taille est généralement inférieure à 2 µm. Elles présentent une structure cristalline unique, caractérisée par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques ou octaédriques, et la capacité d'adsorber des ions à leur surface, en particulier les cations en raison de leur charge négative de surface relativement élevée. Les principaux types d'argile incluent la kaolinite, la smectite, l'illite, ou encore la vermiculite et la montmorillonite.

Ces minéraux peuvent être formés suite à l'altération et au lessivage de sources primaires d'origine diverse (*e.g.*, roches ignées) et soit rester sur place, soit être transportés sur de longues distances.

### ***Exemple au Québec***

Au Québec, seul un gîte d'ETR a été identifié dans des argiles alumineuses. Celui-ci est associé au gisement d'alumine de Grande-Vallée, situé en Gaspésie dans la Province des Appalaches (Fig. 6), et présente des ressources présumées en ETR de 0,6 Mt avec des teneurs moyennes de 18-19 g/t Sc et jusqu'à 75-77 g/t La, 65-70 g/t Nd, 43-53 g/t Y, 32-44 g/t Ga, 18-19 g/t Pr et 10g/t Dy (Orbite Aluminae Inc., [www.orbitealuminae.com](http://www.orbitealuminae.com), mars 2015).

### ***Contexte géologique***

Les argiles se rencontrent dans une grande variété d'environnement géologique (*e.g.*, fond marin océanique, talus continental). Au Québec, les argiles contenant des minéralisations en ETR sont formées sur une marge continentale de type Atlantique, en domaine marin profond (Doran *et al.*, 2012).

### ***Dépôts hôtes***

Les dépôts hôtes incluent essentiellement des argilites riches en kaolinite et en halloysite (Linnen *et al.*, 2014). Au Québec, ces minéralisations sont contenues dans des argilites riches en Al, comprenant de la kaolinite mais aussi probablement de la gibbsite ou de la boehmite (Doran *et al.*, 2012).

### ***Minéralisation***

Les minéralisations en ETR associées aux argiles à adsorption ionique sont caractérisées par de faibles teneurs et de forts tonnages en métaux et sont typiquement riches en terres rares lourdes et pauvres en éléments radioactifs. De plus, elles contiennent des ETR qui sont facilement extraits par exploitation minière à ciel ouvert et qui sont aisément traités. Dans ces indices, la majorité des ETR semble se présenter sous forme de cations adsorbés à la surface de minéraux argileux.

### ***Âge de la minéralisation***

Au Québec, le seul gîte d'ETR connu est associé à la formation de l'Original d'âge Cambrien moyen qui appartient à la nappe de la Rivière Sainte-Anne à l'intérieur de la Zone de Humber, dans les Appalaches (Raffle *et al.*, 2013).

### ***Origine de la minéralisation***

Les minéralisations en ETR dans les argiles à adsorption ionique sont issues de l'altération et du lessivage de roches contenant une proportion significative de minéraux riches en ETR et sensibles au lessivage chimique, tel que les granites. Suite à ces processus, les ETR peuvent être libérés et adsorbés sur les minéraux argileux. D'après Bau (1991), plus le rapport charge/taille des cations est élevé plus ils sont adsorbés. Ainsi, les terres rares lourdes sont préférentiellement concentrées dans ces argiles. Ultérieurement, les ETR adsorbés peuvent être fractionnés et enrichis par des processus d'adsorption-desorption (Kynicky *et al.*, 2012).

### **Évaluation du potentiel économique**

Le Québec présente un fort potentiel pour les minéralisations en ETR, en raison du grand nombre d'indices, gîtes et gisements sur son territoire (Fig. 6), et des teneurs élevées en ETR identifiées dans plusieurs d'entre eux. Les gîtes qui montrent le potentiel le plus élevé sont formés à partir de processus magmatiques et/ou hydrothermaux et sont associés aux complexes de carbonatite, aux roches ignées peralcalines et, dans une moindre mesure, aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au. Les carbonatites sont reconnues dans le monde entier comme l'une des principales sources en terres rares légères alors que les roches ignées peralcalines représentent une excellente source de terres rares lourdes. Aussi, le Québec est en bonne voie pour devenir un producteur majeur en ETR, en particulier les plus critiques, les terres rares lourdes. Plusieurs de ces gîtes sont d'ailleurs actuellement à des stades d'exploration relativement avancés (*e.g.*, Montviel, Eldor, Stange Lake, Kipawa, Kwyjibo).

Les minéralisations québécoises en ETR sont réparties sur l'ensemble du territoire (Fig. 6). Elles sont surtout concentrées dans la Province du Supérieur, la Province de Churchill et la Province de Grenville, mais on retrouve également quelques rares occurrences dans la plateforme du St-Laurent et dans les Appalaches. Celles présentant le plus fort potentiel économique sont le plus souvent d'âge protérozoïque. La présence de ses nombreux gîtes indique



que la probabilité est forte de faire de nouvelles découvertes d'indices d'ETR à forte teneur et fort tonnage dans le futur sur le territoire québécois. Les carbonatites et les intrusions alcalines/hyperalcalines mises en place dans les terrains protérozoïques semblent toutefois représenter les cibles les plus intéressantes à l'heure actuelle et devraient être examinées et étudiées avec le plus grand intérêt (*e.g.*, intrusions alcalines/hyperalcalines dans la Province de Rae dans laquelle est encaissé le gîte de Stange Lake). Toutefois, il est important de ne pas négliger les autres types de gîtes, tels que ceux associés aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au protérozoïques, qui malgré leur faible distribution peuvent représenter des cibles de premier choix.

## **Conclusion**

Le territoire québécois est l'hôte de nombreuses minéralisations en ETR contenues dans différents types de roches ignées, sédimentaires et métamorphiques. Ces minéralisations peuvent être regroupées en six principaux types, soit 1) les gîtes primaires associés aux complexes de carbonatite, 2) les gîtes primaires associés aux roches ignées peralcalines, 3) les gîtes primaires associés à des indices d'oxydes de fer, cuivre, or et ETR de types Kiruna/Olympic Dam, 4) les gîtes primaires associés aux pegmatites granitiques, granites et migmatites hyperalumineux à métalumineux, ainsi qu'aux skarns, 5) les gîtes secondaires associés aux placers et paléoplacers, et 6) les gîtes secondaires associés aux argiles à adsorption ionique. Les gîtes primaires, formés à partir de processus magmatiques et/ou hydrothermaux, sont majoritaires au Québec. Ces minéralisations archéennes à cénozoïques ont été mises en place dans les environnements tectoniques intracontinentaux, le plus souvent en extension, en association étroite avec des structures crustales majeures. Au contraire, les gîtes secondaires, issus de processus sédimentaires et du lessivage, sont minoritaires. Ces minéralisations ont été mises en place entre le Paléozoïque et le Cénozoïque dans des dépôts fluviatiles, glaciaires, fluvio-glaciaires, de plage, de fond marin soulevé, de dune et de cône alluvial ou dans des argilites. Les gîtes primaires et secondaires comprennent tous une grande variété de minéraux contenant des ETR.

Le Québec compte plusieurs gîtes d'ETR, dont certains présentant un fort enrichissement en métaux traces, ce qui fait de cette province l'une des plus prospectives pour ce type de minéralisation au Canada. Plus spécifiquement, les gîtes d'ETR québécois les plus prometteurs

sont associés aux carbonatites, aux intrusions alcalines/hyperalcalines et aux gîtes d'oxydes de fer-Cu-Au mis en place dans les terrains protérozoïques.

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier Monsieur Fabien Solgadi du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) pour l'accès aux données géoscientifiques du Sigeom. Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du réseau DIVEX et du MERN.

## Références

Bau, M., 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology* 93, 219–230.

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.

Brodie, S.A., 2008. The Double S Zone deposit on the north shore of the St. Lawrence Seaway in eastern Quebec, Canada: mineralogic, petrogenetic, and geochronologic constraints. Mémoire de Baccalauréat, University of New Brunswick, 147 p.

Castor, S.B., Hedrick, J.B., 2006. Rare earth elements. In: Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. (Eds), *Industrial minerals and rocks*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, pp. 769–792.

Chakhmouradian, A.R., Wall, F., 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements* 8, 333–340.

Chakhmouradian, A.R., Zaitsev, A.N., 2012. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements* 8, 347–353.

Chakhmouradian, A.R., Mumin, A.H., Demény, A., Elliott, B., 2008. Postorogenic carbonatites at Eden Lake, Trans-Hudson Orogen (northern Manitoba, Canada): geological setting, mineralogy and geochemistry. *Lithos* 103, 503–526.

Chen, W., 2014. Deciphering mantle sources and petrogenetic history of the Oka carbonatite complex, Québec, Canada. Thèse de Doctorat, University of Notre Dame, 246 p.

Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 80, 189–200.

Corriveau, L., 2007. Iron oxide copper-gold deposits: a Canadian perspective. In: Goodfellow, W.D. (Ed.), *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, pp. 307–328.

David, J., Dion, C., Goutier, J., Roy, P., Bandyayera, D., Legault, M., Rhéaume, P., 2006. Datations U-Pb effectuées dans la Sous-province de l'Abitibi à la suite des travaux de 2004–2005. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, RP 2006-04, 22 p.

David, J., Simard, M., Bandyayera, D., Goutier, J., Hammouche, H., Pilote, P., Leclerc, F., Dion, C., 2012. Datations U-Pb effectuées dans les provinces du Supérieur et de Churchill en 2010–2011. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, RP 2012-01, 33p.

Desharnais, G., Duplessis, C., 2011. Montviel core zone REE mineral resource estimate, technical report, Quebec. NI 43-101 report, 74 pp.

Doig, R., Barton, J.M., 1968. Ages of carbonatites and other alkaline rocks in Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences* 5, 1401–1407.

Doran, R., Bouchard, A.-M., Saucier, G., Rheault, M., Ayad, A.B., Knox, A., Lafleur, P.-J., Levaque, J.-G., 2012. Preliminary economic assessment on Orbite Aluminae Inc., metallurgical grade Alumina Projet, Quebec, Canada, NI 43-101 revised technical report, 355 p.

Dugas, J., 1952. Magnetic survey of the Natashquan iron-sands, north shore of the Saint-Lawrence. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, GM 24160, 50 p.

Duplessis, C., Girard, R., 2010. Technical report, niobium and tantalum resource estimation update of the Crevier deposit, north of Lac St-Jean, Quebec, Canada. NI 43-101 report, 110 p.

Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., 1996. Geology of Canadian mineral deposit types. Geological Survey of Canada, Canada, 640 p.

Gauthier, M., Auclair, M., Bardoux, M., Blain, M., Boisvert, D., Brassard, B., Chartrand, F., Darimont, A., Dupuis, L., Durocher, M., Gariépy, C., Godue, R., Jebrak, M., Trottier, J., 1989. Synthèse géologique de l'Éstrie et de la Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 89-20, 681 p.

Gauthier, M., Chartrand, F., Cayer, A., David, J., 2004. The Kwyjibo Cu-REE-U-Au-Mo-F property, Quebec: a Mesoproterozoic polymetallic iron oxide deposit in the northeastern Grenville Province. *Economic Geology* 99, 1177–1196.

Gittins, J., 1989. The origin and evolution of carbonatite magmas. In: Bell, K. (Ed.), *Carbonatites: genesis and evolution*. London: Unwin Hyman, pp. 580–600.

Gittins, J., Harmer, R.E., 2003. Myth and reality in the carbonatite – silicate rock "association". *Periodico di Mineralogia* 72, 19–26.

Gosselin, C., Boily, M., Beaumier, M., Leduc, M., Dion, D.-J., Garneau, 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.

Groulier, P.-A., Ohnenstetter, D., André-Mayer, A.-S., Zeh, A., Solgadi, F., Moukhsil, A., El Basbas, A., 2014. Étude des minéralisations en Nb-Ta de l'intrusion alcaline de Crevier. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, MB 2014-33, 68 p.

Gysi, A.P., Williams-Jones, A.E., 2013. Hydrothermal mobilization of pegmatite-hosted REE and Zr at Strange Lake, Canada: A reaction path model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 122, 324–352.

Harmer, R.E., Gittins, J., 1998. The case for primary, mantle-derived carbonatite magma. *Journal of Petrology* 39, 1895–1903.

Hatch, G.P., 2012. Dynamics in the global market for rare earths. *Elements* 8, 341–346.

Henderson, P., 1984. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: Henderson, P. (Ed.), *Developments in geochemistry — Rare earth element geochemistry*, 2, pp. 1–32.

Hitzman, M.W., 2002. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why? In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*. PGC publishing, Australie, 1, pp. 9–25.

Hou, Z., Tian, S., Yuan, Z., Xie, Y., Yin, S., Yi, L., Fei, H., Yang, Z., 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth and Planetary Science Letters* 244, 234–250.

Jaireth, S., Hoatson, D.M., Mieziotis, Y., 2014. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews* 62, 72–128.

Kjarsgaard, B.A., Hamilton, D.L., 1989. The genesis of carbonatites by immiscibility. In: Bell, K. (Ed.), *Carbonatites: genesis and evolution*. London: Unwin Hyman, pp. 388–404.

Kynicky, J., Smith, M.P., Xu, C., 2012. Diversity of rare earth deposits: the key example of China. *Elements* 8, 361–367.

Laferrière, A., 2011. Technical report, mineral resource estimation, Eldor property–Ashram deposit, Nunavik, Quebec, Commerce Resources Corporation. NI 43-101 report, 82 p.

Lapointe, S., Gauthier, M., Nantel, S., 1993. Étude d'indices d'uranium, de thorium et de molybdène dans la région de Maniwaki–Grand-Remous. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 93-68, 102 p.

Lavergne, C., 1985. Gîtes minéraux à tonnage évalué et production minérale du Québec. Ministère des Ressources naturelles, DV 85-08, 84 p.

Le Bas, M.J., 1977. Carbonatite-nephelinite volcanism: an African case history. Wiley & Sons, UK, 347 p.

Lee, W.-J., Wyllie, P.J., 1998. Processes of crustal carbonatite formation by liquid immiscibility and differentiation, elucidated by model systems. *Journal of Petrology* 39, 2005–2013.

Lehmann, B., 2014. Economic geology of rare-earth elements in 2014: a global perspective. *European Geologist*, 37, 21–24.

Linnen, R.L., Van Lichtenvelde, M., Černý, P., 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. *Elements*, 8, 275–280.

Linnen, R.L., Samson, I.M., Williams-Jones, A.E., Chakhmouradian, A.R., 2014. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits. In: Scott, S.D. (Ed.), *Treatise on geochemistry — Geochemistry of mineral deposits*, 13, pp. 543–568.

Martin, R.F., De Vito, C., 2005. The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2027–2048.

McDonough, W.F., Sun, S.-S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223–253.

McLennan, S.M., Taylor, S.R., 2012. Geology, geochemistry, and natural abundances of the rare earth elements. In: Atwood, D.A. (Ed.), *The rare earth elements: fundamentals and applications*. Wiley, 624 p.

Meinert, L.D., 1993. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada Reprint Series*, 6, 117–134.

MERN, 2014. Nouvelles cibles pour l'exploration minérale – Travaux géoscientifiques 2014. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, PRO 2014-01, 8 p.

Miller, R.R., Heaman, L.M., Birkett, T.C., 1997. U–Pb zircon age of the Strange Lake peralkaline complex: implications for Mesoproterozoic peralkaline magmatism in north-central Labrador. *Precambrian Research* 81, 67–82.

Mitchell, R.H., 2005. Carbonatites and carbonatites and carbonatites. *Canadian Mineralogist* 43, 2049–2068.

Morasse, S., 1988. Geological setting and evolution of the Lac Shortt gold deposit, Waswanipi, Quebec, Canada. *Mémoire de Maîtrise*, Queen's University, 221 p.

MRNF, 2010. Rapport sur les activités minières au Québec 2009. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, DV 2010-01, 76 p.

Mungall, J.E., 2014. Geochemistry of magmatic ore deposits. In: Scott, S.D. (Ed.), *Treatise on geochemistry — Geochemistry of mineral deposits*, 13, pp. 195–218.

Nadeau, O., Cayer, A., Pelletier, M., Stevenson, R., Jébrak, M., 2015. The Paleoproterozoic Montviel carbonatite-hosted REE–Nb deposit, Abitibi, Canada: geology, mineralogy, geochemistry and genesis. *Ore Geology Reviews* 67, 314–335.

Petrella, L., 2012. The nature and origin of REE mineralization in the Misery syenitic intrusion, northern Québec, Canada. *Thèse de Maîtrise*, McGill University, 91 p.



Raffle, K.J., Deakin, M., Rantala, E., 2013. Assessment report on the Grande-Vallée North property, Haute Gaspésie, Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, GM 67595, 38 p.

Richardson, D.G., Birkett, T.C., 1996. Peralkaline rock-associated rare metals. In: Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (Eds), *Geology of Canadian mineral deposit types*, Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, 8, pp. 523–540.

Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, UK, 352 p.

Rudnick, R.L., Gao, S., 2014. Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.), *Treatise on geochemistry — The crust*, 4, pp. 1–51.

Saucier, G., Noreau, C., Casgrain, P., Côté, P., Laroche, E., Bilodeau, M., Hayden, A., Poirier, E., Garon, M., Bertrand, V., Kissiova, M., Mailloux, M., Rougier, M., Camus, Y., Gagnon, G., 2013. Feasibility study for the Kipawa project, Temiscamingue area, Québec, Canada. NI 43-101 report, 429 p.

Shannon, R.D., 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica A* 32, 751–767.

Skirrow, R.G., Raymond, O.L., Bastrakov, E., Davidson, G., Heithersay, P., 2002. The geological framework, distribution and controls of Fe-oxide Cu-Au mineralisation in the Gawler Craton, South Australia. Part II - alteration and mineralisation. In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*. PGC publishing, Australie, 2, pp. 33–47.

Tanaka, K., Takahashi, Y., Shimizu, H., 2008. Local structure of Y and Ho in calcite and its relevance to Y fractionation from Ho in partitioning between calcite and aqueous solution. *Chemical Geology* 248, 104–113.

Thorpe, R.I., Guha, J., Franklin, J.M., Loveridge, W.D., 1984. Use of a Superior Province lead isotope framework in interpreting mineralization stages in the Chibougamau District. In: Guha, J., Chown, E.H. (Eds), Chibougamau - Stratigraphy and mineralization, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 34, pp. 496–516.

Trudel, P., 1983. Gîtologie et métallogénie des minéraux du Québec: compilation et analyse des écrits pour la période 1950-1981. Ministère des Ressources naturelles, DV 83-03, 357 p.

U.S. Geological Survey, 2015. Mineral commodity summaries 2015. U.S. Geological Survey, 196 p., <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>.

Van Breemen, O., 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, 431–455.

Veksler, I.V., Nielsen, T.F.D., Sokolov, S.V., 1998. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis. *Journal of Petrology* 39, 2015–2031.

Wall, F., Mariano, A.N., 1996. Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi. In: Jones, A.P., Wall, F., Williams, C.T. (Eds), *Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits*. Chapman and Hall, UK, pp. 193–225.

Walters, A., Lusty, P., Hill, A., 2011. Rare earth elements. British Geological Survey, Commodity Profiles Series, 54 p.

Weill, D.F., McKay, G.A., Kridelbaugh, S.J., Grutzeck, M., 1974. Modeling the evolution of Sm and Eu abundances during lunar igneous differentiation. *Proceedings of the Fifth Lunar Conference* 2, 1337–1352.

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 371–405.

Wright, W. R, Mariano, A.N., Hagni, R.D, 1998. Pyrochlore, mineralization and glimmerite formation in the Eldor (Lake LeMoyne) carbonatite complex, Labrador Trough, Quebec, Canada. In: 33rd forum on the Geology of industrial minerals, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 50, pp. 205–213.

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
505796	505796	22P03	20	343812	5660072	Cu-ETR	Mo-Au-Th	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
543332	543332	22P03	20	327272	5657952	Nb-Cu	Ag-ETR	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
07-AD-10024	07-AD-10024	22F06	19	476478	5476678	ETR	Fe-Ti-P-Nb	Indéterminé	
07-AM-292	07-AM-292	22F03	19	493863	5450046	ETR	Th-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-AE-2149B	13-AE-2149B	22K07	19	503389	5589641	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-AM-07A	13-AM-07A	22K10	19	510199	5620952	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-AM-10B	13-AM-10B	22K10	19	511247	5618279	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-AM-13A	13-AM-13A	22K10	19	512052	5614036	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-FS-1202C	13-FS-1202C	22K10	19	510162	5601234	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-TC-5008D	13-TC-5008D	22K07	19	504614	5585041	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
13-TC-5072B	13-TC-5072B	22K10	19	510668	5603384	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
14-AM-28B	14-AM-28B	31O16	18	547593	5303836	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
94-14	94-14	22P03	20	339712	5657921	Cu-ETR	Ag-Mo	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Acme Molybdénite	Acme Molybdénite	31J05	18	432877	5140074	Mo	U-ETR	Indéterminé	
Advance	Advance	31G09	18	573062	5042221	Nb-ETR		Complexe de carbonatite	
Alleyn	Alleyn	31I16	18	709615	5183589	ETR-Th	Ce-F	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Amélie	Amélie	22F03	19	487574	5449737	U-Th	Fe-Ti-V-Nb-Pb±ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Amittuujaq1	Amittuujaq1	24I12	20	352536	6497865	ETR-U-Th	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Andradite	Andradite	22P03	20	341762	5659321	Ag-Mo-Cu-ETR	U-Zr	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Anomalie G5R6	Anomalie G5R6	22G05	19	582822	5460524	Th-ETR	U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Anomalie J2R1	Anomalie J2R1	22J02	19	663396	5560575	Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Anomalie J6L1-Centre	Anomalie J6L1-Centre	22J06	19	640086	5588376	Nb-Ta-Zr-ETR	U-Th	Indéterminé	
Anomalie J6L1-Ouest	Anomalie J6L1-Ouest	22J06	19	639471	5588976	Nb-Ta-Zr-ETR	U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Anomalie K3R1	Anomalie K3R1	22K03	19	493796	5546900	U-Th	ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Aqpiq	Aqpiq	24I12	20	347792	6497934	ETR-U-Th-Mo	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Aqpiq Nord-Ouest	Agpiq Nord	24I12	20	347539	6498205	U-Th-ETR-Ag	Pb-Mo-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Aqpiq Sud-Est	Agpiq Sud	24I12	20	348226	6497648	U-Th-ETR	Pb-Mo-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Baie Mercier	Baie Mercier	31J13	18	426228	5181025	U-ETR-Th	Pb-Mo-Zn	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Skarn
Baie Quetachou	Baie Quetachou	12L07	20	517069	5572227	U-ETR	Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Bouscadillac (Zone A)	Bouscadillac (Zone A)	31G09	18	571779	5042123	Nb-ETR	Fe-U-Th	Complexe de carbonatite	
Boxi	Boxi	31O05	18	451997	5236549	U-Th-Nb-Ta-ETR	W-Pb-Ag	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Capri		31J12	18	429627	5165374	U	Cu-Mo-ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Canari	Canari	31L16	17	697466	5196212	ETR		Roches ignées peralcalines	
Carbonatite de Montviel	Carbonatite de Montviel	32F15	18	390176	5520522	Nb-ETR	P	Complexe de carbonatite	
Carbonatite de Cantley	Carbonatite de Cantley	31G12	18	443652	5044923	ETR		Complexe de carbonatite	
Carbonatite de Montviel - Sud	Carbonatite de Montviel - Sud	32F15	18	389596	5519491	Nb-ETR-Th	Pb	Complexe de carbonatite	
Carbonatite de Quinville	Carbonatite de Quinville	31G12	18	447427	5046123	ETR		Complexe de carbonatite	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Carbonatite de Templeton	Carbonatite de Templeton	31G12	18	445352	5047273	ETR			Complexe de carbonatite
Certitude	Certitude	31L16	17	701882	5189695	ETR-Zr-Nb-Ta-Th		Roches ignées peralcalines	
Certitude Nord	Certitude Nord	31L16	17	701664	5191445	ETR-Zr-Nb-Ta-Th	U	Roches ignées peralcalines	
Certitude Sud	Certitude Sud	31L16	17	701399	5188620	ETR-Zr-Nb-Th	U	Roches ignées peralcalines	
Chukotat Ouest	Chukotat Ouest	35F08	18	446007	6803382	Zn-ETR	Ag-Pb	Indéterminé	
Coconut Club	Coconut Club	31L15	17	682902	5206924	Th-ETR-Au-Ag	Zr	Roches ignées peralcalines	
Coude Sangumialuk-Est	Coude Sangumialuk-Est	24F16	19	547382	6422522	Th	ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Coude Sangumialuk-Ouest	Coude Sangumialuk-Ouest	24F16	19	542281	6422760	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Eagle	Eagle	31L16	17	696429	5195330	ETR-Th		Indéterminé	
Ech. 425699	Ech. 425699	12L07	20	505747	5578760	U	Th-ETR	Indéterminé	
Éch. 68790215	Éch. 68790215	33G03	18	469259	5872673	U-Th	ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Éch. 5510507	Éch. 5510507	33B13	18	459229	5845325	U-Th-ETR-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Éch. 5510671	Éch. 5510671	33B11	18	470790	5836183	U-Th-ETR-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Éch. 5519720	Éch. 5519720	33B12	18	457761	5839661	U-Th-ETR-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Éch. 68990010	Éch. 68990010	33B10	18	527614	5839902	ETR-Th	U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Éch. 295518	Éch. 295518	24I12	20	338519	6490926	Th-U-ETR	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Émilie DF-025	Émilie DF-025	32F07	18	360217	5457440	ETR		Complexe de carbonatite	
Émilie DF-059	Émilie DF-059	32F07	18	361456	5461443	ETR		Indéterminé	
Erlandson No 1 (Northwest)	Erlandson No 1	24C16	19	535846	6312180	Nb-Ta-Th-ETR	U	Complexe de carbonatite	
Erlandson No 2 (Southeast)	Erlandson No 2	24C16	19	538071	6311029	Nb-ETR-Th-Ta	Zr-P-F	Complexe de carbonatite	
Ernest	Ernest	22K15	19	515511	5642612	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Exclamation Point	Exclamation Point	31L15	17	684115	5190779	ETR-Th	Nb	Indéterminé	
Faille Ottman	Faille Ottman	32D06	17	635283	5373351	Au	Ag-Zn-Pb-ETR	Indéterminé	
Falaises	Falaises	31L16	17	695564	5186346	ETR-Zr-Th		Roches ignées peralcalines	
Falardeau	Falardeau	22D11	19	343800	5381450	Nb-ETR		Complexe de carbonatite	
Fluorine	Fluorine	22P03	20	342062	5658821	Cu-ETR-Ag	P-W-Th-Co	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
GLU-08-02	GLU-08-02	32F07	18	368725	5459558	ETR	Zn	Indéterminé	
Gold Rim		21N13	19	432846	5302772	U-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Grande-Vallée North	Grande-Vallée North	22H03	20	328710	5444520	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ETR		Argile	



**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Graupe	Graupe	22J10	19	655673	5613199	ETR-Th	Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Guido	Guido	22I11	20	338032	5623521	Fe-ETR-Ag	Th-W-Au	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Haltaparche	Haltaparche	32B01	18	558789	5329531	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Île de l'Amazonite	Île de l'Amazonite	31L16	17	696415	5189925	ETR-Zr		Roches ignées peralcalines	
Indice 17243	Indice 17243	34H15	18	636270	6412390	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Indice du Village Saint-Augustin	Indice du Village Saint-Augustin	12O02	21	384753	5676643	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Jonas3	Jonas3	24I12	20	350178	6500453	U-Th-Zr-Ag	Pb-ETR	Indéterminé	
Josette	Josette	22P03	20	340864	5657915	Cu-ETR-Ag-Fe	W-U-Au	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Julien	Julien	22D16	19	408756	5423651	Th-ETR		Indéterminé	
Lac Advance-NNE		23P07	20	401521	6139569	-	ETR	Indéterminé	
Lac à la Petite	Lac à la Petite	31O06	18	482178	5235130	Th-Zr-ETR-U	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac à la Tortue	Lac à la Tortue	31K08	18	406355	5140892	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Brennan	Lac Brennan	31L16	17	695108	5187312	ETR-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Brennan-Est	Lac Brennan-Est	31L16	17	698043	5189601	ETR-Zr		Roches ignées peralcalines	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Lac Brennan-NE	Lac Brennan-NE	31L16	17	698114	5191394	ETR-Zr-Nb-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Brennan-Nord	Lac Brennan-Nord	31L16	17	696601	5192516	ETR-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Brennan-SE	Lac Brennan-SE	31L16	17	696656	5187189	ETR-Zr-Nb-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Brennan-SO	Lac Brennan-SO	31L16	17	694154	5186297	ETR-Zr-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Brisson (Strange Lake)	Lac Brisson	24A08	20	430263	6241897	ETR-Zr-Nb	Be-U-Sn-Ta-Ra	Roches ignées peralcalines	
Lac Camp Nord	Lac Camp Nord	31L16	17	699640	5192887	ETR-Zr-Nb	Ag	Indéterminé	
Lac Chukotat	Lac Chukotat	35G05	18	451318	6804518	ETR	Cu-Zn	Placer/Paléoplacer	
Lac Couillard	Lac Couillard	12K07	20	655064	5574723	Zr-ETR	Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Couillard (Zone 3a)	Lac Couillard (Zone 3a)	12K07	20	659664	5577323	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac de la Roche	Lac de la Roche	31O03	18	483771	5220241	U-Th-Au-Nb-Ta	ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Déléage	Lac Déléage	31K08	18	412844	5146200	ETR-Th-Zr	U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac des Trente et un Milles	Lac des Trente et un Milles	31J05	18	440700	5128450	ETR-Th-Zn-Zr		Indéterminé	
Lac des Trente et un Milles Est	Lac des Trente et un Milles Est	31J05	18	441728	5128411	ETR-Th		Indéterminé	
Lac des Trente et un Milles Nord	Lac des Trente et un Milles Nord	31J05	18	440765	5129447	ETR-Th		Indéterminé	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Lac des Trente et un Milles SE	Lac des Trente et un Milles SE	31J05	18	442318	5126810	ETR-Th		Indéterminé	
Lac du Granite		35C15	18	393329	6760237	Cu-Au	ETR-Zr-Co-As	Indéterminé	
Lac du Milieu	Lac du Milieu	32A15	18	660303	5410326	ETR-Th		Indéterminé	
Lac du Raton	Lac du Raton	32A15	18	658431	5407970	ETR-Th-Zr		Indéterminé	
Lac Edmond	Lac Edmond	31O06	18	482777	5234590	U-Th-ETR	Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Egan	Lac Egan	31K08	18	413832	5147081	ETR	Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Étienne	Lac Étienne	22D16	19	410279	5423593	ETR-Th-Cu	Au	Indéterminé	
Lac Fafard	Lac Fafard	22C04	19	433517	5324702	U-ETR	Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Green	Lac Green	31K08	18	400990	5148751	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Guindon	Lac Guindon	31K02	18	379744	5096134	ETR-Th		Indéterminé	
Lac Harding	Lac Harding	31K08	18	412491	5149752	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Harding Sud	Lac Harding Sud	31K08	18	411243	5148294	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Jacques	Lac Jacques	32A15	18	656889	5423468	ETR-Cu-Fe-Zr	Th-Ni	Complexe de carbonatite	
Lac Klondike	Lac Klondike	31L16	17	698698	5182731	ETR-Nb		Indéterminé	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Lac Le Moyne 29813	Lac Le Moyne 29813	24C16	19	537852	6310775	Nb-Ta	ETR-U	Complexe de carbonatite	
Lac Le Moyne 39052	Le Moyne 39052	24C16	19	535740	6313886	Nb-Ta	ETR-U	Complexe de carbonatite	
Lac Le Moyne 39053	Lac Le Moyne 39053	24C16	19	535694	6313890	ETR		Complexe de carbonatite	
Lac Lepage	Lac Lepage	32B07	18	514642	5359813	Au-Cu	ETR	Indéterminé	
Lac Leroux	Lac Leroux	31O05	18	450135	5242233	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Leroux-Ouest	Lac Leroux-Ouest	31O05	18	449937	5243686	ETR-Th-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Lindsay	Lac Lindsay	31L09	17	699866	5179945	ETR-Zr		Roches ignées peralcalines	
Lac Lindsay-SO	Lac Lindsay-SO	31L09	17	698842	5179466	ETR-Zr		Indéterminé	
Lac Lyon	Lac Lyon	31O05	18	449786	5238223	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Marie	Lac Marie	31K08	18	407729	5145057	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Marmont (anciennement Lac Gad)	Lac Marmont (lac Gad)	22I14	20	335862	5625522	Fe	P-Mn-Ti±ETR	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Lac McKillop-Nord	Lac McKillop-Nord	31L15	17	682189	5195824	ETR-Th-Zr		Indéterminé	
Lac McKillop-Ouest	Lac McKillop-Ouest	31L15	17	683228	5193164	ETR-Nb-Zr-Th-U		Roches ignées peralcalines	
Lac McKillop-Sud	Lac McKillop-Sud	31L15	17	684487	5191559	ETR-Nb	Zr	Roches ignées peralcalines	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Lac Moore	Lac Moore	32B04	18	427898	5319464	ETR		Indéterminé	
Lac Mud	Lac Mud	31F15	18	374467	5092963	ETR	U-Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Skarn
Lac Paradis 1	Lac Paradis 1	22K15	19	512663	5629069	Ni-Cu-ETR	Co-Ti-Cr-Ag	Indéterminé	
Lac Petit	Lac Petit	12L07	20	511021	5579638	U-ETR	Th-Mo	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Savigny-NE	Lac Savigny-NE	24C07	19	514244	6252428	ETR	Nb	Complexe de carbonatite	
Lac Sheffield (Kipawa)	Lac Sheffield (Kipawa)	31L15	17	690697	5186670	ETR-Zr	Nb-U-Th	Roches ignées peralcalines	
Lac Sheffield-Est	Lac Sheffield-Est	31L16	17	692170	5185439	ETR-Zr-Th-Nb	U	Roches ignées peralcalines	
Lac Simard	Lac Simard	31M10	17	670611	5285628	Li-ETR	Ta-Nb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Sparks	Lac Sparks	31L16	17	699629	5189832	ETR-Zr-Nb-Th		Roches ignées peralcalines	
Lac Square	Lac Square	31L16	17	696117	5181655	ETR-Zr		Indéterminé	
Lac Tarse	Lac Tarse	31K08	18	402019	5147250	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Turgeon	Lac Turgeon	12L07	20	509152	5583738	U-ETR	Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lac Turgeon (Zone 1)	Lac Turgeon (Zone 1)	12L07	20	504113	5578573	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Lataille Nord	Lataille Nord	35H02	18	629804	6788346	ETR		Roches ignées peralcalines	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Lataille Sud	Lataille Sud	35H02	18	629648	6786855	ETR		Roches ignées peralcalines	
Makwa	Makwa	31L16	17	702620	5192439	ETR-Zr-Th-Nb		Roches ignées peralcalines	
Malachite	Malachite	22P03	20	340652	5658521	Fe-Cu-Th-Ag	Zr-ETR	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Manoka	Manoka	31G09	18	576079	5044623	Nb-ETR-Th		Complexe de carbonatite	
Meksan	Meksan	23D08	19	408180	5814780	Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Miali	Miali	22J07	19	659544	5581912	ETR-Th-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Mine du Lac Shortt	Carbonatite du Lac Shortt	32G12	18	437718	5495725	ETR-Zr	Th	Complexe de carbonatite	
Mine St-Lawrence Columbiun (Main Oka)	Mine St-Lawrence Columbiun (Main Oka)	31G09	18	575877	5039095	Nb-ETR	Mg	Complexe de carbonatite	
Misery Lake	Misery Lake	13M05	20	442500	6131750	ETR-Zr-Nb		Roches ignées peralcalines	
MISF-02-08	MISF-02-08	32P15	18	654924	5738743	U	V-ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Montviel - Nord (A)	Montviel - Nord (A)	32F15	18	389102	5526866	ETR-Nb		Complexe de carbonatite	
Montviel - Nord (B)	Montviel - Nord (B)	32F15	18	390122	5527707	ETR-Nb	P	Complexe de carbonatite	
Morrice-Carrier	Morrice-Carrier	34H08	18	651625	6353938	Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Niotaz Sud	Niotaz Sud	32H07	18	664248	5482060	Nb-Ta	ETR-Zr-U-Fe	Complexe de carbonatite	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Oka Columbium	Oka Columbium	31G08	18	577229	5037223	Nb-ETR		Complexe de carbonatite	
Pakwa	Pakwa	31L16	17	695267	5188811	ETR-Zr-Nb-Th	Ta-U	Roches ignées peralcalines	
Pegmatite I	Pegmatite I	31I05	18	587340	5130874	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Philadelphia	Philadelphia	31G13	18	455252	5071827	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Skarn
Picard 2	Picard 2	22K11	19	473795	5611496	ETR-Ag		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Pointe Morin		35C13	18	338429	6742638	Zn-Cu	ETR	Indéterminé	
Proulx	Proulx	32F07	18	364207	5459045	ETR		Complexe de carbonatite	
Proulx - N	Proulx - N	32F07	18	363571	5460446	ETR		Complexe de carbonatite	
Proulx - SE	Proulx - SE	32F07	18	365455	5458108	ETR		Complexe de carbonatite	
Puqila NO	Puqila NO	24I06	20	369039	6467246	Th-ETR-U	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
R4.2	R4.2	24I05	20	348333	6475354	Th-U-ETR	Pb-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
R4.4	R4.4	24I05	20	348215	6476920	U-Th-ETR-Mo	Pb-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Raoul	Raoul	31O15	18	535989	5309822	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Rapides Turner	Rapides Turner	31L16	17	699600	5191720	ETR-Th-Nb-U-Zr	Ta-Ag	Roches ignées peralcalines	
Réservoir Mitchinamecus	Réservoir Mitchinamecus	31O06	18	483524	5233598	U-Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Riv. Nabisipi	Riv. Nabisipi	12L08	20	559138	5571168	U-ETR	Fe-Zr	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Riv. Wedding-NO	Riv. Wedding-NO	32F07	18	372245	5458670	ETR	Zr	Complexe de carbonatite	
Riverin	Riverin	22F12	19	442922	5492932	ETR-Th	U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Rivière Kipawa-Nord	Rivière Kipawa-Nord	31L16	17	694870	5185110	ETR-Zr		Roches ignées peralcalines	
Rivière Kipawa-Sud	Rivière Kipawa-Sud	31L16	17	694585	5184114	ETR-Nb-U-Zr		Roches ignées peralcalines	
Rodrigue	Rodrigue	22P03	20	343092	5659351	Cu-ETR	Fe-Mo-Ag-Au-Th	Gîte d'oxydes de fer-Cu-Au	
Route Fort-George (Km 34)	Route Fort-George (Km 34)	3,30E+11	17	662085	5950658	Th	Zn-ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Roxane	Roxane	31O06	18	474514	5253164	U-Nb-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Seigneurie	Seigneurie	22C11	19	481559	5382144	U-Th-Nb-ETR-Zr		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Siurivvik	Siurivvik	24J03	19	613023	6442099	ETR	P-Th-Sr-Zn	Indéterminé	
Snake Centre	Snake Centre	31L15	17	681763	5202736	Th-ETR	U	Roches ignées peralcalines	



**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Snake Nord	Snake Nord	31L15	17	682573	5203834	ETR-Zr-U-Th	Ag	Roches ignées peralcalines	
Snake Sud	Snake Sud	31L15	17	681737	5201181	ETR-Th		Roches ignées peralcalines	
South Rae-2004	South Rae-2004	24H12	20	334698	6383146	ETR-U-Th	Mo	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
South Rae-2018	South Rae-2018	24H13	20	322248	6404844	U-Th-Mo	Pb-ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
St-Andre-2	St-Andre-2	31G09	18	555838	5046363	Nb-ETR	F	Complexe de carbonatite	
St-Lawrence Columbium (Bloc D)	St-Lawrence Columbium (Bloc D)	31G08	18	577229	5038423	Nb		Complexe de carbonatite	
Surprise	Surprise	31L16	17	702998	5189168	ETR-Nb-Ta-Zr	Th-U	Roches ignées peralcalines	
Surprise Nord	Surprise Nord	31L16	17	703374	5190006	ETR-Zr-Nb-Th-U		Roches ignées peralcalines	
Taner No 1		23P01	20	435012	6116684	Zircon	ETR	Indéterminé	
Target10	Target10	24I12	20	350366	6509261	U-Th-ETR	Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Target108	Target108	24I12	20	337156	6491126	Th-ETR	Pb-U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Tasialuk Extension	Tasialuk Extension	24I12	20	334542	6489398	Th-U-ETR	Zr-Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Terres Rompues	Terres Rompues	22D06	19	338367	5372019	ETR-Nb-Zr-Th	Ta-Ag	Complexe de carbonatite	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Terres Rompues - SE	Terres Rompues - SE	22D06	19	338747	5371020	ETR-Nb		Complexe de carbonatite	
TH (Tower Hill)	TH (Tower Hill)	31L16	17	694750	5194461	ETR-Zr-Th		Indéterminé	
Torrent Sud	Torrent Sud	24I05	20	341340	6483127	U-ETR-Zr-Mo-Th	Ag-Pb	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
TR-90-6 (Projet Cameron)	TR-90-6 (Projet Cameron)	32F07	18	367179	5457553	ETR-Th-Zr		Complexe de carbonatite	
Urani-22	Urani-22	24F16	19	536971	6418609	U-Th	ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Urani-NE	Urani-NE	24F16	19	539459	6421752	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Vernot-Dubé-1	Vernot-Dubé-1	34H15	18	631250	6416219	Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Vernot-Larocque-18	Vernot-Larocque-18	34H15	18	629875	6418844	U	Th-ETR	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Vernot-Larocque-4	Vernot-Larocque-4	34H15	18	629063	6420563	ETR-Th		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Vernot-Quirion-4	Vernot-Quirion-4	34H15	18	629438	6420938	Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Versant	Versant	12M07	20	531894	5702869	U-Th-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Victor	Victor	22K15	19	520863	5626653	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

Nom indice	Nom corps minéralisé	Feuillet SNRC	Fuseau	Estant	Nordant	Substances principales	Substances secondaires	Type	Sous-type
Villion	Villion	22K06	19	466269	5587069	ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Wares	Wares	21L06	19	331795	5130295	ETR-Th-Zr		Placer/Paléoplacer	
Xénolite	Xénolite	31L15	17	683261	5191782	ETR-Zr-Th	Nb	Indéterminé	
Yates Moly	Yates Moly	31F15	18	379206	5090394	Mo-Cu-ETR	U-Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Skarn
Ytterby 1 - éch. 1955	Ytterby 1 - éch. 1955	24A01	20	424187	6220364	ETR		Roches ignées peralcalines	
Ytterby 1 - éch. 1988	Ytterby 1 - éch. 1988	24A01	20	424877	6219756	ETR		Roches ignées peralcalines	
Ytterby 1 - éch. 2114	Ytterby 1 - éch. 2114	24A01	20	419907	6230734	ETR		Roches ignées peralcalines	
Yttria	Yttria	32B10	18	506956	5393100	ETR-Nb	Zr	Roches ignées peralcalines	
Zel	Zel	35F03	18	387129	6776107	Cu-ETR		Placer/Paléoplacer	
Zircon-Reine	Zircon-Reine	22J02	19	664033	5562938	ETR-Zr-Nb-Ta	Th	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Zone 90	Zone 90	33F13	18	304676	5963582	Th	ETR-K-U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Zone 99	Zone 99	33F13	18	308351	5965107	Th	ETR-Zn-U	Roches ignées hyper- à métalumineuses	Pegmatite granitique, granite
Zone A-L'Espérance	Indice Brisson	32G12	18	429495	5492803	ETR-Ag	Au	Indéterminé	
Zone B	Zone B	24A08	20	428016	6243135	ETR	Zr-Nb-Be-F	Roches ignées peralcalines	

**Annexe 1.** Liste des occurrences, indices et gîtes en ETR au Québec (données extraites de la base de données du SIGEOM) (suite).

<b>Nom indice</b>	<b>Nom corps minéralisé</b>	<b>Feuillet SNRC</b>	<b>Fuseau</b>	<b>Estant</b>	<b>Nordant</b>	<b>Substances principales</b>	<b>Substances secondaires</b>	<b>Type</b>	<b>Sous-type</b>
Zone B Est	Zone B Est	24A08	20	431504	6243099	ETR	Zr-Nb-Be-F	Roches ignées peralcalines	
Zone Matte	Zone Matte	31F15	18	380627	5091624	Th-U-ETR		Roches ignées hyper- à métalumineuses	Skarn
Zones PB & PS	Zones PB & PS	31L16	17	693411	5184852	Zr-ETR-Th-Nb		Roches ignées peralcalines	