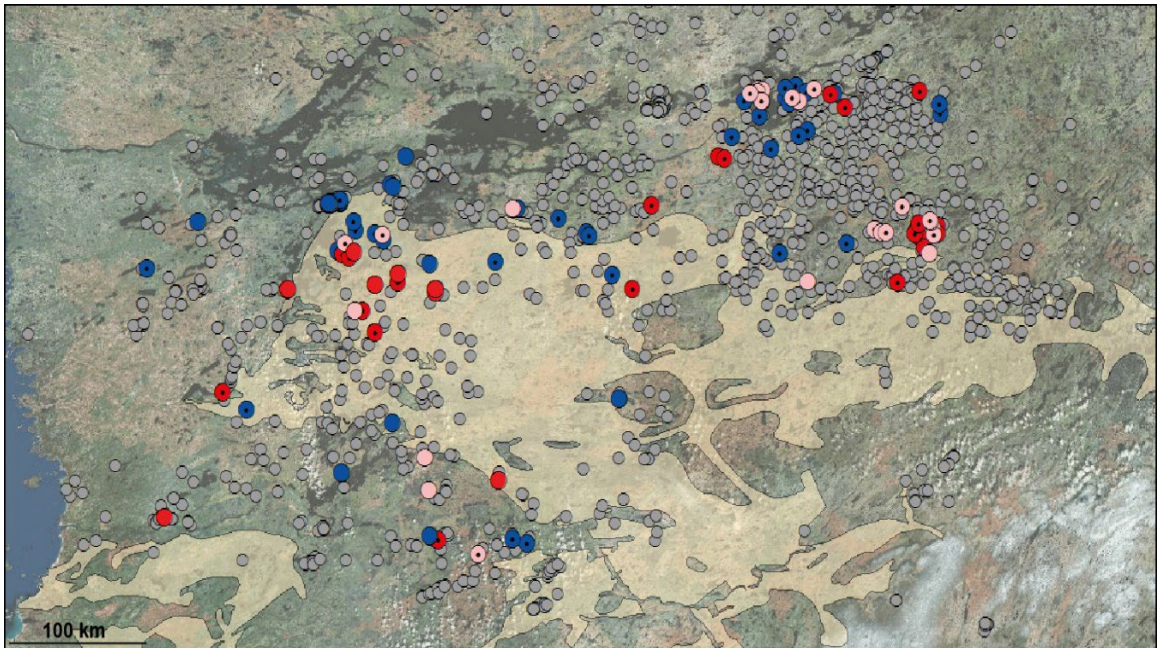


Vers un nouveau modèle d'exploration pour la région d'Eeyou Istchee Baie- James : les granitoïdes aurifères

Morgane Gigoux, Ph. D.



Projet 2017-03

Avertissement

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics au bénéfice de l'ensemble de la communauté géoscientifique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Gigoux, M., 2018. Vers un nouveau modèle d'exploration pour la région d'Eeyou Istchee Baie-James : les granitoïdes aurifères. Rapport, projet CONSOREM 2017-03, 50 pages.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.



Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1
Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca

Site Web : www.consorem.ca



Résumé

Le projet CONSOREM 2017-03, initialement intitulé « les granitoïdes aurifères de la Baie James », est né de l'intérêt croissant des compagnies d'exploration à comprendre la récente découverte de minéralisations en or dans le pluton de Cheechoo. Localisée près du contact entre la Sous-province d'Opinaca et la Sous-province de La Grande et à moins de 15 km au sud de la mine Éléonore, cette intrusion datée à 2612 Ma présente un fort potentiel aurifère selon les récents travaux de sondages de la compagnie minière Ressources Sirios. Le projet original visait à identifier les caractéristiques et les contextes favorables pour les granitoïdes aurifères du territoire d'Eeyou Istchee Baie-James. Aux vues du contexte particulier de la tonalite aurifère de Cheechoo, unique intrusion de nature tonalitique très tardive actuellement connue dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, l'objectif principal de ce projet a été de déterminer sa signature géochimique et d'en comparer ses caractéristiques avec celles des autres granitoïdes du territoire. L'initiation d'une nouvelle collaboration avec la compagnie Ressources Sirios à la fin de 2017 a permis le bon déroulement de ce projet grâce au partage de la base de données lithogéochimiques intégrale (éléments majeurs, traces et terres rares) sur différents échantillons de six forages et de rainures issus des campagnes d'exploration 2016 et 2017.

La première partie du projet a été de déterminer la signature du pluton de Cheechoo (minéralogie et géochimie) afin d'en comparer ses caractéristiques avec les autres granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James. Il s'agit d'une granodiorite tardive très probablement polyphasée comme le suggèrent les précurseurs modélisés avec la possibilité de plusieurs précurseurs. La seconde partie du projet s'est concentrée sur les différentes caractéristiques géochimiques des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (diorite, tonalite, granodiorite et granite) en utilisant l'ensemble des échantillons contraints par la géochronologie et disponibles dans la base de données lithogéochimique du SIGÉOM. Le pluton de Cheechoo montre des signatures très différentes de l'évolution magmatique régionale classique avec une composition particulièrement peralumineuse. On note des similitudes entre les caractéristiques géochimiques de la tonalite aurifère de La-Grande-Sud et la granodiorite de Cheechoo, caractérisées par de faibles teneurs en terres rares et des compositions peralumineuses.

Sur la base des analyses de roches totales en éléments majeurs, les pressions de cristallisation des différents types de granitoïdes ont pu être déterminées à partir des équations de Yang (2017). La méthode a été vérifiée sur des plutons de différentes natures en Abitibi. Les pressions ont été calculées à partir des concentrations en éléments majeurs modélisées d'après la méthode des précurseurs modélisés sous LithoModeleur afin de s'affranchir de l'effet de l'altération. Une grande majorité des pressions obtenues pour les tonalites, granodiorites et granites sont inférieures à 400 MPa, ce qui indique des mises en place à basses pressions. Pour l'exploration minière, l'intérêt de ces basses pressions de cristallisation est qu'elles peuvent indiquer une mise en place de système de type porphyrique à faibles profondeurs (< 8 km).

Enfin, à l'aide des bilans de masses calculés et des minéraux normatifs caractéristiques de l'intrusion de Cheechoo, des échantillons cibles de granitoïdes (SIGÉOM) ont pu être sélectionnés et considérés comme ayant une signature géochimique comparable. Ce guide d'exploration des granitoïdes permet de faire ressortir quatre secteurs d'intérêts dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James. Les résultats du projet permettent également de souligner l'importance des minéralisations aurifères associées aux intrusions, et remettent au goût du jour la traque du métasomatisme sodique, qui pourrait être étendue en Abitibi.



Table des matières

1-	INTRODUCTION	5
2-	CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MÉTALLOGÉNIE	6
2.1	SYNTHÈSE GÉOCHRONOLOGIQUE DES INTRUSIONS PLUTONIQUES D'EYYOU ISTCHEE BAIE-JAMES.....	6
2.2	LE CONTACT OPINACA-LA GRANDE	7
2.3	LES GRANITOÏDES AURIFÈRES D'EYYOU ISTCHEE BAIE-JAMES	9
3-	QU'EST-CE QUE LE PLUTON DE CHEECHOO ?	11
3.1	ASSEMBLAGES MINÉRALOGIQUES	11
3.2	SIGNATURE GÉOCHIMIQUE	13
3.3	BILAN DE MASSES PAR MODÉLISATION DES PRÉCURSEURS	15
4-	COMPARAISON AVEC LA GÉOCHIMIE DES GRANITOÏDES D'EYYOU ISTCHEE BAIE-JAMES.....	18
4.1	ÉLÉMENTS MAJEURS	18
4.2	ÉLÉMENTS TRACES	25
5-	CALCULS DES PRESSIONS DE CRISTALLISATION.....	28
5.1	PRINCIPE DE LA MÉTHODE	28
5.2	LIMITES DE LA MÉTHODE	28
5.3	CALIBRATION ET VÉRIFICATION	29
5.4	APPLICATION AUX GRANITOÏDES D'EYYOU ISTCHEE BAIE-JAMES.....	30
5.5	APPLICATION AU PLUTON DE CHEECHOO	32
5.6	ÉVALUATION DU POTENTIEL DE FERTILITÉ PORPHYRIQUE À CHEECHOO.....	33
5.7	INTERPRÉTATION	34
6-	GUIDES D'EXPLORATION POUR LES GRANITOÏDES D'EYYOU ISTCHEE BAIE-JAMES	36
6.1	EXISTE-T-IL D'AUTRES « CHEECHOO » ?.....	36
6.1.1	<i>Secteurs d'intérêts pour une nouvelle exploration des plutons d'Eeyou Istchee Baie-James</i> 36	
7-	CONCLUSION	44
8-	REMERCIEMENTS.....	45
9-	RÉFÉRENCES	46



1- Introduction

La région d'Eeyou Istchee Baie-James, longtemps ignorée par les compagnies minières, connaît un essor considérable depuis la découverte du gisement aurifère Roberto en 2004. L'intérêt s'est tout d'abord naturellement porté sur les ceintures de roches vertes du territoire, beaucoup plus petites que celles de l'Abitibi. Plusieurs projets au CONSOREM ont vu le jour de 2004 à 2016 dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, notamment sur la fertilité des petites ceintures de roches vertes (projet CONSOREM 2004-01; Pearson 2007) en passant par l'étude des environnements sédimentaires aurifères en terrain de haut grade métamorphique (projet 2007-07; Lapointe, 2008), des formations de fer aurifères (projet 2015-02; Bigot, 2015) ou encore du potentiel de la Sous-Province d'Opatika (projet 2016-01; Lavoie, 2017). Très peu de projets se sont intéressés aux granitoïdes dans la région, le dernier en date étant le projet 2011-07 (Faure 2012) sur les porphyres Cu-Au subalcalins dans les terrains de haut grade métamorphique archéens et paléoproterozoïques au Québec.

L'intérêt soudain grandissant pour les intrusions d'Eeyou Istchee Baie-James est principalement dû à la découverte récente de la tonalite aurifère de Cheechoo. La minéralisation est rencontrée dans la tonalite mais également au sein de schistes à biotite et muscovite. D'autres projets d'exploration en cours dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James portent également sur des intrusions comme le projet Au33 de Dios, ciblant un grand pluton de granodiorite/tonalite et dykes de diorite. Cependant, aucun âge n'est encore disponible pour cette intrusion aurifère.

L'âge obtenu à Cheechoo (2612 Ma; Fontaine *et al.*, 2015) lève un projecteur sur les intrusions post- à tardi- tectoniques. Ces intrusions couvrent grossièrement 30 000 km² du territoire, soit l'équivalent de 15 % d'Eeyou Istchee Baie-James. Les superficies des unités plutoniques s'étendent de 35 à 6 000 km², avec l'exemple de la suite du Vieux Comptoir représentant 4 700 km².

D'après Fontaine *et al.*, (2015), un événement minéralisateur aurifère se produirait dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, entre 2675 et 2600 Ma. Au cours de ces 75 Ma, les roches turbiditiques sont profondément enfouies, fortement inclinées et métamorphisées au faciès amphibolitique. Cette succession de phénomènes géologiques intenses entraîne la production massive de fluides. Cette période (après 2670 Ma) est également caractérisée par l'absence d'activité volcanique et par la sédimentation des bassins de Némiscau, d'Opinaca (Québec) et de Quetico (Ontario). Ces bassins sont touchés par un métamorphisme de haute température et de basse pression et la remontée de matériel chaud situé à la base de la croûte et provoquée par un détachement de la lithosphère pour produire un métamorphisme et une fusion partielle profonde (Moukhsil et Legault, 2002).

Différents épisodes de minéralisations aurifères sont également évoqués au sud-ouest du Groenland sur le craton archéen (Kolb *et al.*, 2013). Trois épisodes sont distingués : 2860-2830 Ma; 2740 Ma; et 2660-2600 Ma. Ils sont reliés à des épisodes orogéniques majeurs au cours de l'évolution du craton Nord Atlantique et spatialement associés à des zones de cisaillement crustales. L'épisode aurifère le plus tardif est décrit par des conditions de pression/température hypozonale associées à un faciès granulite. La source des fluides aurifères est suggérée comme extérieure aux granulites.



2- Contexte géologique et métallogénique

2.1 Synthèse géochronologique des intrusions plutoniques d'Eeyou Istchee Baie-James

La classification des granitoïdes néoarchéens du Supérieur dans le SIGÉOM a été réalisée par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) sur la base de relations de terrains, de compositions géochimiques et des âges isotopiques U-Pb. Il en résulte trois groupes de granitoïdes : 1) pré-tectoniques ou syn-volcaniques (S12), 2) syn-tectoniques (S13 à S18) et 3) tardi- à post-tectoniques (S19 à S21). Une première synthèse concerne l'ensemble des âges disponibles actuellement sur l'ensemble des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (92 datations, de 3452 Ma à 2602 Ma; Figure 1), et une seconde se concentre plus particulièrement sur les granitoïdes tardi- à post-tectoniques (35 datations; Figure 2).

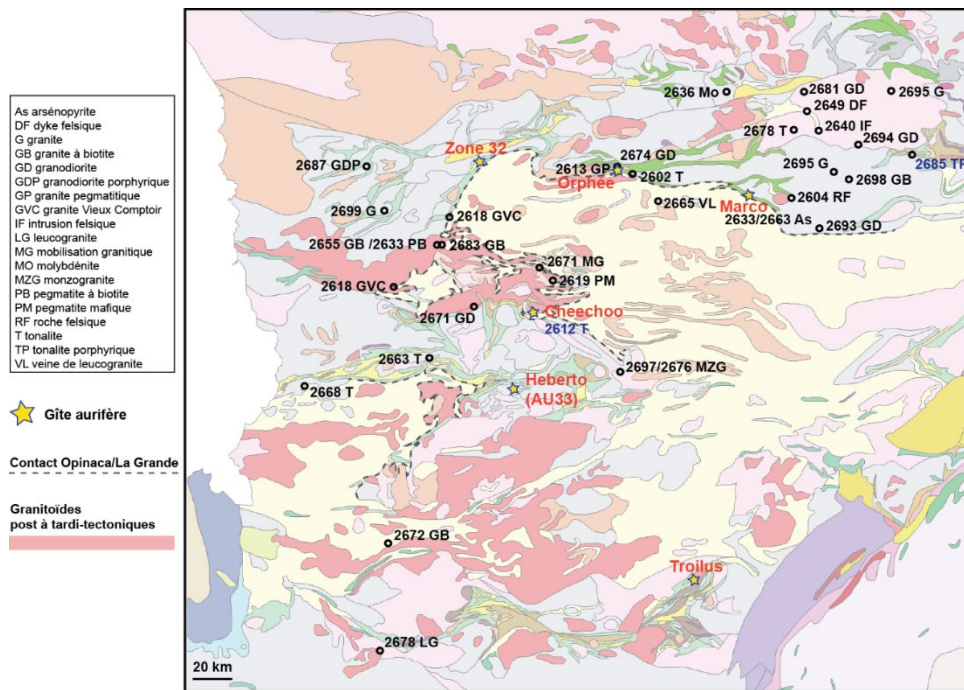


Figure 1. Distribution des âges des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (SIGÉOM). Les deux âges les plus vieux (3431 Ma et 3452 Ma) sur des gneiss granitiques (feuillelet 33F03) ne sont pas représentés sur l'histogramme.

Une grande majorité des âges post-tectoniques se situe proche du contact La Grande-Opinaca, qui montre l'intérêt croissant pour la compréhension de la mise en place des intrusions de ces deux sous-provinces. La majorité des âges reflète l'âge de cristallisation de l'intrusion mais il existe également des âges interprétés comme des âges métamorphiques ou encore des âges « hérités » (Figure 1). Concernant le calage temporel des minéralisations aurifères au contact des deux sous-provinces, seulement trois datations (Re-Os) sont associées directement à la minéralisation (arsénopyrite et molybdénite) au niveau de l'indice aurifère Marco (2633 Ma et 2663 Ma; Aucoin, 2008) et de l'indice de porphyre à Mo de Tilly (2636 Ma; Chapon, 2011). L'ensemble de ces datations reflète directement des événements minéralisateurs tardifs à l'Archéen après 2660 Ma.

La distribution de l'ensemble des datations disponibles dans le secteur Opinaca-La Grande montre un pic de l'activité magmatique autour de 2715-2700 Ma (Figure 1). Après 2670 Ma, il existe une activité magmatique moins intense mais associée à des événements minéralisateurs plus tardifs dans l'histoire d'Eeyou Istchee Baie-James. Les travaux de Ravenelle (2013), Fontaine *et al.* (2015;



2017) montrent cette tendance avec de nombreuses datations obtenues sur des pegmatites stériles et fertiles, des veines de leucogranites encaissées dans les roches métasédimentaires du secteur Éléonore, de 2620 Ma à 2603 Ma.

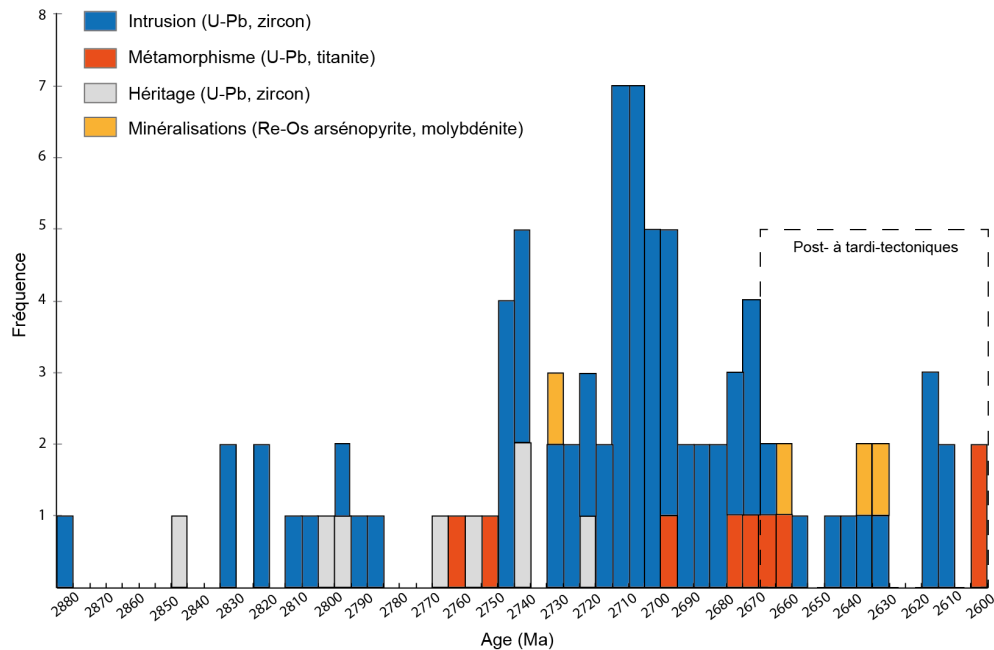


Figure 2. Répartition des âges des granitoïdes post- 2700 Ma dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James. Chaque abréviation représente la nature de la roche datée, décrite dans la légende de gauche. Les âges en bleu (2612 Ma et 2685 Ma ; Fontaine *et al.*, 2015 ; David et Parent, 1997) représentent les deux seuls âges de cristallisation post- à tardi-tectoniques de plutons de nature tonalitique. Les autres âges (2678, 2668, 2663, et 2602 Ma) sont interprétés comme des âges métamorphiques sur la base de datations U-Pb sur la titanite (Moukhsil et Legault, 2002; Moukhsil *et al.*, 2001; Goutier *et al.*, 2002; Davis *et al.*, 2015).

Parmi l'ensemble des six datations post- 2700 Ma sur les tonalites, seules deux d'entre elles vont être interprétées comme des âges de cristallisation : 2612 Ma pour l'intrusion de Cheechoo, qui est l'âge le plus jeune, et 2685 Ma pour une tonalite porphyrique au nord-est d'Eeyou Istchee Baie-James (Figure 2). Au contact Opinaca-La Grande, l'âge néoarchéen le plus jeune à 2602 Ma, obtenu pour une intrusion proche des indices aurifères Ilto et Orphée, est interprété comme un âge métamorphique (Goutier *et al.*, 2002).

A noter que plusieurs datations ont été obtenues pour la suite du granite du Vieux Comptoir et révèlent plusieurs phases de mise en place : la plus ancienne serait celle datée à 2683 Ma, la seconde est celle à 2655-2633 Ma, puis la plus jeune correspondrait aux deux datations à 2618 et 2613 Ma. Le granite du Vieux Comptoir (Avcr) a été décrit par Goutier *et al.* (1999) : ce sont des intrusions granitiques à patine blanche à rosée, pas à peu déformées, de grain moyen à grossier, localement pegmatitiques, pauvre en minéraux mafiques (moins de 10 % de biotite et hornblende ± muscovite ± tourmaline ± grenat) et qui sont caractérisées par plusieurs types de faciès.

2.2 Le contact Opinaca-La Grande

Le contact entre les roches métasédimentaires du bassin d'Opinaca et les intrusions de la Sous-province de La Grande semble ressortir aujourd'hui comme un métallotecte important, comme l'avaient déjà souligné les travaux de Gauthier *et al.*, (2007). Cette hypothèse est largement confirmée par la localisation de nombreux indices aurifères connus dans la région (Figure 3)



couplée aux récents travaux d'exploration de Ressources Sirios pour la partie Nord, Azimut Exploration et Eastmain Resources pour la partie sud du pluton de Cheechoo.

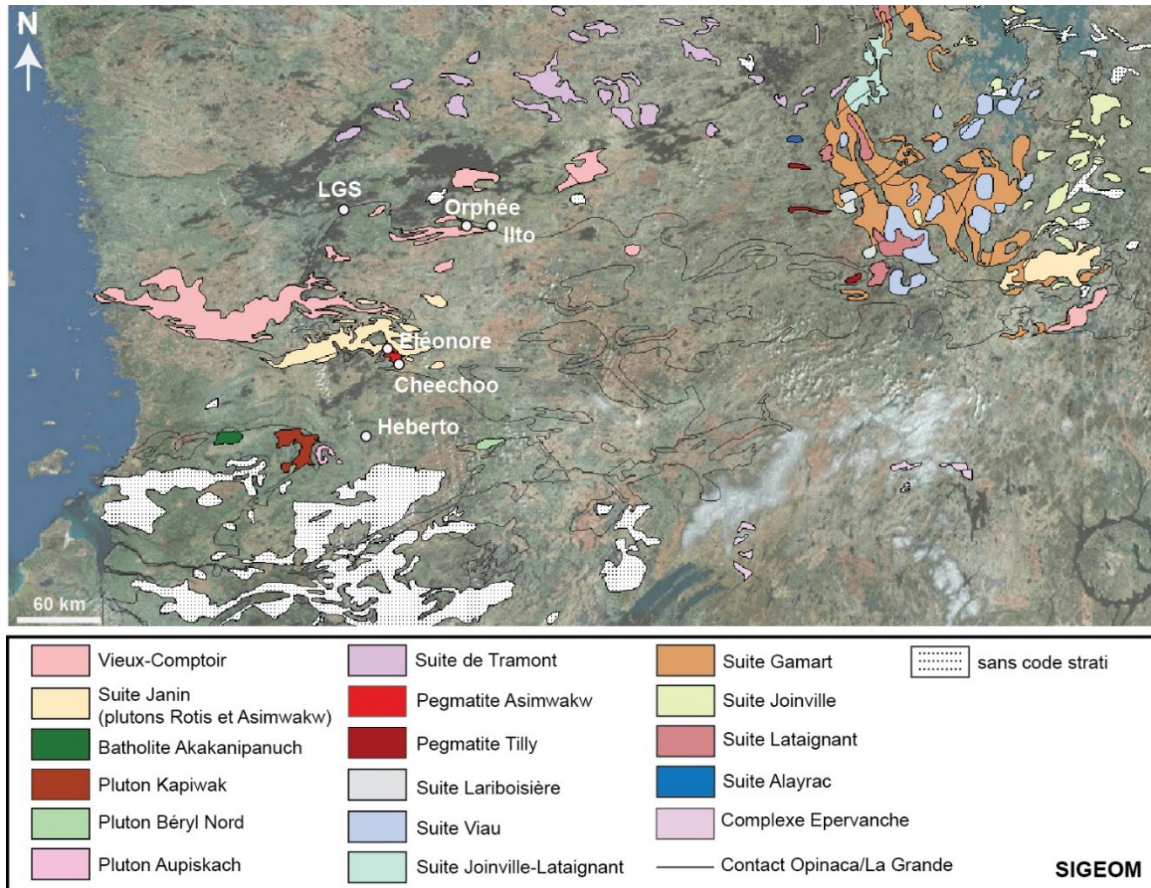


Figure 3. Répartition des granitoïdes post- à tardi- tectoniques d'Eeyou Istchee Baie-James, d'après la base de données du SIGÉOM. En blanc sont localisés quelques gîtes et gisements aurifères actuellement connus sur le territoire, proche du contact Opinaca-La Grande.

Il existe actuellement plusieurs hypothèses géodynamiques pour expliquer la formation du contact entre les sous-provinces de La Grande et d'Opinaca, impliquant diverses approches pour l'exploration minière. Les travaux de Gauthier et al., (2007) ont mis en évidence la relation entre la distribution spatiale des minéralisations aurifères et les hauts gradients métamorphiques dans la région, plus particulièrement au contact de ces deux sous-provinces aux faciès métamorphiques contrastés.

Le modèle qui ressort est celui qui associe le bassin d'Opinaca à l'hypothèse d'un complexe métamorphique central (Lapointe, 2008). L'hypothèse est basée sur des arguments 1) structuraux (foliation principale régionale concentrique autour du bassin, linéation d'étirements radiale au bassin, pendages faibles à sub-horizontaux, zones de cisaillement mylonitiques en périphérie); 2) métamorphiques (métamorphisme plus intense au centre du Complexe de Laguiche et forts gradients métamorphiques en périphérie); et 3) lithologiques (présence de petits bassins sédimentaires de grès et de conglomérats en périphérie; Lapointe, 2008).

Un système de dômes et de bassins plus ou moins étirés et démembrés est également évoqué comme autre modèle structural (Bandyayera *et al*, 2010). Les intrusions granitiques tardives constitueraient le cœur des dômes dans le bassin. La phase de déformation D2 serait responsable

de ce style structural avec la présence de bassins allongés E-O (Remick, 1977, Bandyayera *et al.*, 2010).

Un dernier modèle basé sur des données structurales et géothermobarométriques suggère que la Sous-province d'Opinaca représenterait un bassin intracontinental archéen formé au cours d'une période d'extension antérieure à la déformation régionale D1 avec des métasédiments qui chevauchent la Sous-province de La Grande (Cadéron, 2003).

Les récents travaux du MERN (Côté-Roberge *et al.*, 2016; 2018) sont en accord avec l'argument avancé d'une augmentation du métamorphisme des marges vers le centre du bassin, en faveur d'un modèle de complexe métamorphique central. Cependant les pendages ne sont pas cohérents avec l'hypothèse de systèmes de chevauchement. Les auteurs confirment également la présence d'une structure en dôme et bassins, probablement couplée à d'autres événements tectono-métamorphiques successifs. Les travaux récents ont mis en évidence deux phases de métamorphisme : une période à 2670 Ma associée à de basses pressions et de hautes températures avec la cristallisation des monazites, zircons et cordiérites; puis une seconde à 2645 Ma associée à de moyennes pressions et hautes températures avec la cristallisation de grenats et staurotides. Il pourrait être question d'un polymétamorphisme continu ou discontinu relié à un épisode de rift avec une chaleur importante suivi d'un épisode de compression (Côté-Roberge *et al.*, 2018).

2.3 Les granitoïdes aurifères d'Eeyou Istchee Baie-James

Les relations spatiales entre des minéralisations aurifères et des intrusions magmatiques ont été constatées depuis longtemps (Emmons, 1937; Routhier, 1963; Lowell et Guilbert, 1970; Sillitoe, 1991) et mis en évidence plus particulièrement pour des intrusions réduites au cours des années 1990 et 2000 en Alaska et au Yukon (Hollister, 1992; Sillitoe, 1991; Thompson *et al.*, 1999; Thompson et Newberry, 2000; Hart, 2005). Dans sa proposition d'une nouvelle classification « pratique » des gisements d'or, Phillips et Powell (2015), soulèvent le fait que les appellations liées aux encaissants granitiques (sous-entendu « *intrusion-hosted* ou *-related gold deposit* ») décrivent généralement des encaissants qui sont favorables chimiquement et mécaniquement parlant, mais ne semble pas correspondre directement à la source de l'or ou des fluides minéralisateurs. Ils reflètent également les différents événements minéralisateurs.

L'association spatiale entre les minéralisations aurifères et les petites intrusions intermédiaires à felsiques porphyriques est connue dans les ceintures de roches vertes du craton du Supérieur en Abitibi et sur le craton Ouest australien (Sinclair *et al.*, 1982; Witt, 1992; Hodgson, 1993; Robert, 2001; Durning *et al.*, 2007; Fayol *et al.*, 2016). Les intrusions peuvent jouer le rôle de moteur thermique (VMS), d'encaissant compétant (veines orogéniques) ou encore de source de fluides et de métaux (intrusions alcalines). En Abitibi, les travaux de Robert (2001) et Fayol *et al.*, (2016) montrent l'étroite relation spatiale entre les syénites tardives archéennes et les minéralisations aurifères disséminées.

Ces relations, qu'elles soient spatiales ou génétiques, ne sont pas anecdotiques puisqu'il existe des plutons aurifères reconnus d'intérêt économique actuellement au Québec et en Ontario, comme l'exemple du projet Coté Gold avec une minéralisation de faible à moyenne teneurs en or associée à des roches intrusives localement mafiques bréchiques intermédiaires à felsiques (Katz *et al.*, 2015). Dans ce cas-ci, les roches intrusives sont représentées par une masse bréchique centrale minéralisée dans une diorite qui est entourée de granodiorite. Le gisement de Côté Gold représente un vaste système aurifère interprété comme un gisement porphyrique aurifère archéen (Katz *et al.*, 2015).

Au sud d'Eeyou Istchee Baie-James, le gisement de Troilus est associé à plusieurs types de roches intrusives (diorite et tonalite; Fraser, 1993; Goodman *et al.*, 2005). Troilus est un des plus vieux



gisements connus dans la région, avec un âge de mise en place de l'encaissant dioritique estimé à 2782 ± 6 Ma (Dion *et al.*, 1998). Proche du contact Opinaca - La Grande, les travaux de Mercier-Langevin *et al.*, (2012) montrent le potentiel aurifère de la tonalite syn-volcanique de La-Grande-Sud (2,1 g/t d'or), datée à 2734 Ma. Il s'agit d'une tonalite de nature calco-alcaline peralumineuse, métamorphisée au faciès des schistes verts supérieurs (assemblage albite-épidote-chlorite-biotite), peu de feldspaths potassiques, avec une minéralisation disséminée et peu de sulfures (jusqu'à 5 %, Mercier-Langevin *et al.*, 2012). Il existe également les indices aurifères Orphée et Ilto où la minéralisation est disséminée dans des pegmatites et diorites/tonalites, associées à des formations de fers (Bogatu et Huot, 2016). L'indice Ilto, découvert en 2009, présente une faible minéralisation de pyrite disséminée dans une diorite, dans les volcanites mafiques et dans les roches métasédimentaires. Il existe également des injections centimétriques à métriques de dykes de pegmatites. L'indice aurifère appartient au pluton Le Moyne, dont l'âge est estimé entre 2703 et 2713 Ma. Un âge métamorphique plus jeune a été obtenu par datation U-Pb sur titanite à 2602 ± 3 Ma (Goutier *et al.*, 2002).

Plus récemment, la tonalite/granodiorite d'Héberto (1,21 g/t d'or) découverte par Dios Exploration, à l'ouest de la zone Eau Claire, démontre là encore le potentiel aurifère des roches plutoniques de la région en cours d'exploration. La compréhension de la mise en place de l'intrusion fait également l'objet d'un projet de recherche en cours (Blu, 2017).

L'âge de cristallisation obtenu pour l'intrusion hôte de l'indice Cheechoo (2612 Ma, Fontaine *et al.*, 2017), révèle un contexte plutonique jeune au cours du Néoarchéen, encore peu documenté dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James. Cheechoo est une propriété détenue à 100 % par la compagnie Ressources Sirios, couvrant 75 km² (145 claims) et localisée à moins de 20 km au sud de la Mine Éléonore. En 2010, la découverte de Cheechoo a été initiée par la localisation d'anomalies en or, arsenic et tungstène dans les analyses d'humus des sols (Ressources Sirios). La première campagne de forage débute en 2012 et révèle que la minéralisation aurifère est localisée au sein d'un intrusif de nature tonalitique silicifiée avec de très faibles quantités de sulfures, principalement arsénopyrite et pyrrhotite disséminés. Dans le cadre de ce projet, six forages des campagnes 2016 et 2017 (2150 m au total), ont été sélectionnés pour l'étude géochimique de la signature du pluton de Cheechoo. Un décapage réalisé en 2016 a permis une cartographie géologique détaillée de la zone (Figure 4).

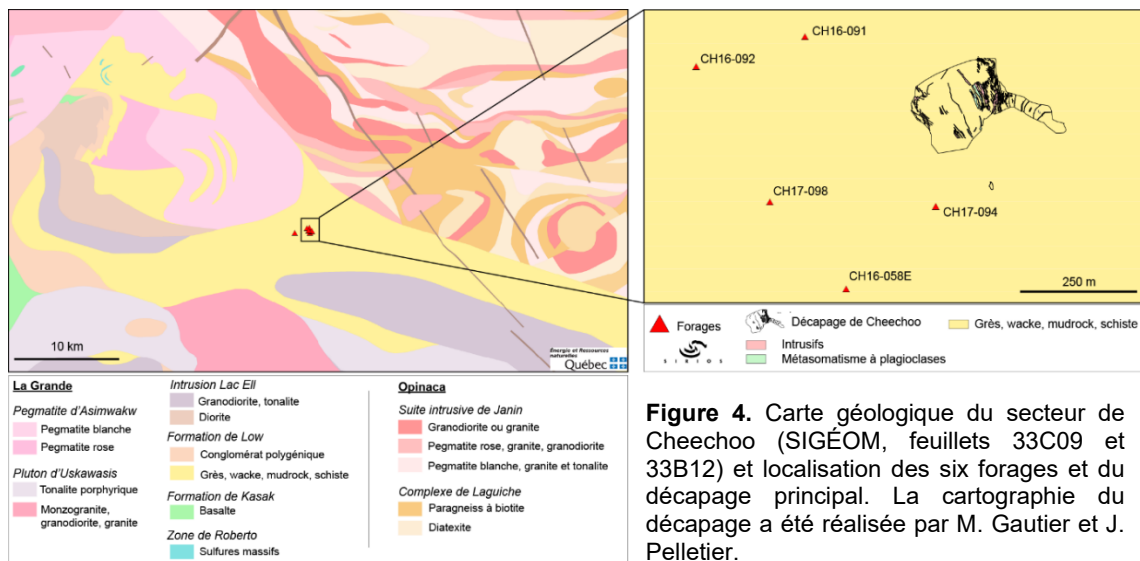


Figure 4. Carte géologique du secteur de Cheechoo (SIGÉOM, feuillets 33C09 et 33B12) et localisation des six forages et du décapage principal. La cartographie du décapage a été réalisée par M. Gautier et J. Pelletier.

Les récents travaux de Fontaine *et al.*, 2017 sur le secteur de la mine Éléonore ont permis de mettre à jour la carte géologique des feuillets 33C09 et 33B12, incluant aussi la zone géologique



de Cheechoo (Figure 5). Les détails de cette nouvelle cartographie permettent de mettre en évidence la présence de formation de fer proche d'un cisaillement régional E-O et de l'indice Moni, localisé dans le pluton de Cheechoo. L'indice est localisé en bordure d'intrusion, proche du contact Opinaca-La Grande et également de structures S-E. Localement, une unité conglomeratique déformée (2702 ± 3 Ma; Ravenelle *et al.*, 2010) est en contact direct avec des intrusions, qui pourraient être la continuité de l'intrusion de Cheechoo comme le suggère la récente cartographie (Figure 5).

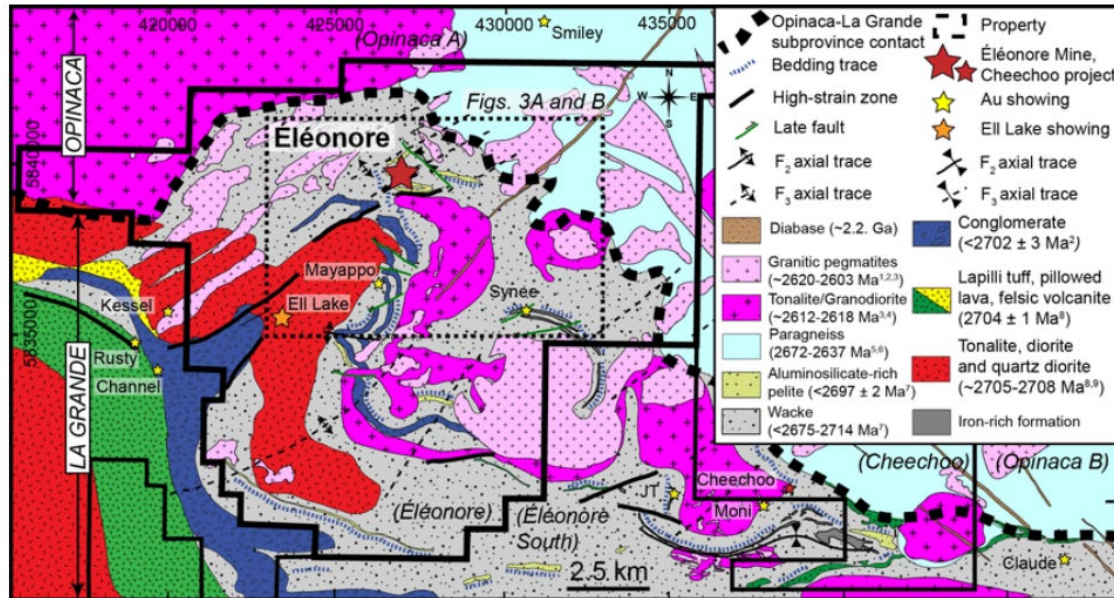


Figure 5. Carte géologique détaillée du secteur d'Éléonore et de Cheechoo mise à jour par Fontaine *et al.*, (2017).

3- Qu'est-ce que le pluton de Cheechoo ?

3.1 Assemblages minéralogiques

Des descriptions pétrographiques détaillées de 10 lames minces de la minéralisation aurifère du gîte de Cheechoo et de ses roches hôtes, mises à la disposition du CONSOREM par Ressources Sirios dans le cadre de ce projet, permettent l'identification des assemblages d'altération et la caractérisation des minéralisations rencontrées. Cette caractérisation a été effectuée par IOS service scientifique (L. Tremblay, 2013, projet 919).

Les faciès rencontrés et leurs assemblages minéralogiques caractéristiques sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Figure 6).

L'or se retrouve associé aux veines de quartz, en inclusion dans les grains d'arsénopyrite ou encore libre dans la matrice. On le retrouve parfois en imprégnation dans le plagioclase altéré et/ou la biotite. Des observations macroscopiques de scheelite ont également été remarquées sous lampe UV sur plusieurs échantillons. La présence de scheelite est aussi remarquable directement sur les décapages du gîte de Cheechoo (A. Fontaine et J. Pelletier, communication personnelle).

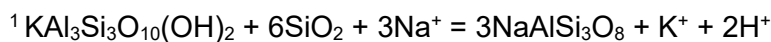
Selon les observations de Tremblay (2013), les assemblages minéralogiques principaux révèlent une altération propylitique (chlorite- épidote-albite-calcite), légèrement séricitique (muscovite-pyrite) et localement argileuse (kaolinite-préhnite). L'altération potassique représentée par la présence de biotite et de microcline interstitiel n'est pas dominante pour l'intrusion. Cependant, elle est plus importante au niveau des roches métasédimentaires avec l'abondance de biotite.



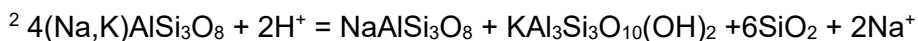
L'intrusion de Cheechoo est caractérisée par une altération sodique consécutive avec l'omniprésence de plagioclases recristallisés (albite). Au regard des observations pétrographiques, une altération par albitisation¹ des feldspaths est à envisager à Cheechoo mais la séricitisation² ou l'altération propylitique³ peuvent également mener à la formation d'albite et peuvent aussi se surimposer à l'albitisation. La présence importante de cristaux et de veines de quartz est également à noter, mais n'est pas nécessairement le résultat d'un phénomène de silicification. Seuls les calculs de bilans de masses pourront confirmer le gain ou non en silice à Cheechoo.

Minéraux	Tonalite minéralisée	Tonalite non minéralisée	Pegmatite	Paragneiss
Plagioclase	60-70 %	70 %	67 %	42 %
Quartz	10 à 20 %	15-20 %	14 %	25 %
Biotite	tr à 7 %	1 à 3 %		28 %
Muscovite			0.3%	
Microcline	2 à 4 %	4-5 %		
Amphibole	4 à 12 %	tr à 4 %		
Chlorite	tr à 2 %	0.2 %	4 %	0.5 %
Tourmaline	tr	tr à 5 %	11 %	
Titanite	0.2-0.3 %	tr	tr	
Préhnite	tr			
Sillimanite	0.3			
Carbonate	tr	tr	tr	
Epidote	tr	tr	tr	tr
Pyrrhotite	0.6 à 2%	tr à 0.4 %	tr	3
Arsénopyrite	0.1 à 0.3%	tr	tr	tr
Pyrite	tr	tr	tr	1.5
Sphalérite			tr	
Chalcopryrite	tr		tr	0.2
Or	0.58 à 25.9 g/t	0.01 à 0.02 g/t	0.74 g/t	0.11 g/t

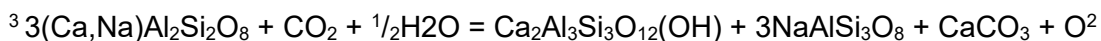
Figure 6. Tableau synthétique des assemblages minéralogiques des différents faciès rencontrés sur l'indice Cheechoo, sur la base d'observations pétrographiques de lames minces (rapport n913, IOS, L. Tremblay, 2013); Tr : trace.



muscovite + quartz + fluide = albite + fluide



feldspath alcalin + fluide = albite + muscovite+ quartz+ fluide



plagioclase + fluide = épidote + albite + calcite

Le faciès métamorphique le plus représentatif de l'ensemble de la paragenèse sur la propriété Cheechoo semble être le faciès amphibolite avec une abondance notable d'amphiboles (hornblende) dans la tonalite minéralisée, associées à la titanite. L'identification de sillimanite



fibreuse suggère des conditions de pression/température plus élevées que celles au faciès des schistes verts. Le faciès amphibolite est cohérent avec le grade métamorphique régional identifié par les travaux de Gauthier *et al.* (2007) dans le secteur de Cheechoo, proche du contact Opinaca-La Grande. L'absence d'orthopyroxène ne permet pas de déterminer si la roche a atteint le faciès des granulites, mais certaines observations de terrains et de microstructures à l'échelle de la lame mince pourraient indiquer un début de fusion partielle (Tremblay, 2013).

3.2 Signature géochimique

Dans le cadre du projet d'exploration de Cheechoo par Ressources Sirios, six forages des campagnes 2016 et 2017 (2 150 m au total) ont fait l'objet d'une étude géochimique complète (majeurs et traces) avec au total plus de 1 400 échantillons de roches. Des échantillons de rainures de différents décapages ont également été étudiés dans le cadre de ce projet (environ 2 000 données).

Afin de déterminer la signature caractéristique du pluton de Cheechoo, les échantillons identifiés comme étant des tonalites (I1D) dans les forages et les rainures ont été séparés (2 475 au total) des échantillons où la présence de pegmatite, de veines de quartz et/ou de roches métasédimentaires a été rapportée dans la base de données. Parmi l'ensemble des échantillons tonalitiques, il existe 198 échantillons de faciès porphyrique qui représentent les échantillons les moins affectés par l'altération d'après les observations de terrain effectuées par Ressources Sirios.

La distribution des éléments traces pour l'ensemble des échantillons de l'intrusion de Cheechoo est synthétisée par les enveloppes grises des spectres multi-éléments et des spectres de terres rares pour l'intrusion dite tonalitique (Figures 7 et 8A). Les spectres multi-éléments montrent une anomalie négative en Ti-Nb et positive en Ta avec peu de fractionnement entre les terres rares légères (LREE; *light rare earth elements*) et les terres rares lourdes (HREE; *heavy rare earth elements*). Les signatures en éléments majeurs et traces sont différentes de ce qui est connu pour les intrusions alcalines classiques, et se démarquent aussi légèrement des compositions TTG (tonalite-trondhjemite-granodiorite) calco-alcalines à l'Archéen. En effet il existe, au sein de l'intrusion de Cheechoo, des anomalies positives en tantale, ce qui implique une mobilité différentielle de Ta dans les fluides par rapport au comportement de Nb. Les teneurs en Ta varient entre 0,1 et 22 ppm, avec une moyenne de 0,8 ppm (2 273 données) qui se rapproche des moyennes connues dans la croûte continentale (Kalfoun, 2007). Il existe aussi un fractionnement important entre Th et U, avec des rapport Th/U qui varient de 0,06 à 10 pour une moyenne de 1,2. La corrélation qui existe entre Th et U suggère que ces variations de concentrations en U et Th soient dues à des processus magmatiques.

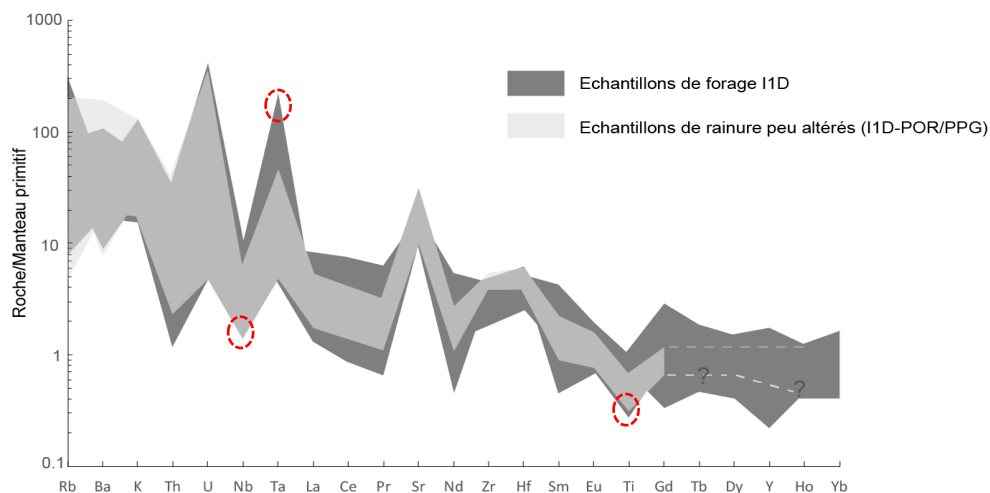


Figure 7. Diagrammes multi-éléments synthétiques des échantillons de forages et de rainures à Cheechoo.



La plupart des spectres des terres rares montre une anomalie légèrement positive en europium, contrairement aux spectres des pegmatites qui enregistrent une anomalie négative prononcée en europium (Figures 8A et B). Les faciès pegmatitiques enregistrent un spectre de type spectre en mouette (*seagull pattern*) qui est interprété comme résultant d'un intense fractionnement des plagioclases et d'un appauvrissement en LREE (Glazner *et al.*, 2008). C'est également le patron typique des granites à deux micas en Abitibi comme le batholite de Preissac-Lacorne (Mujla, 1995).

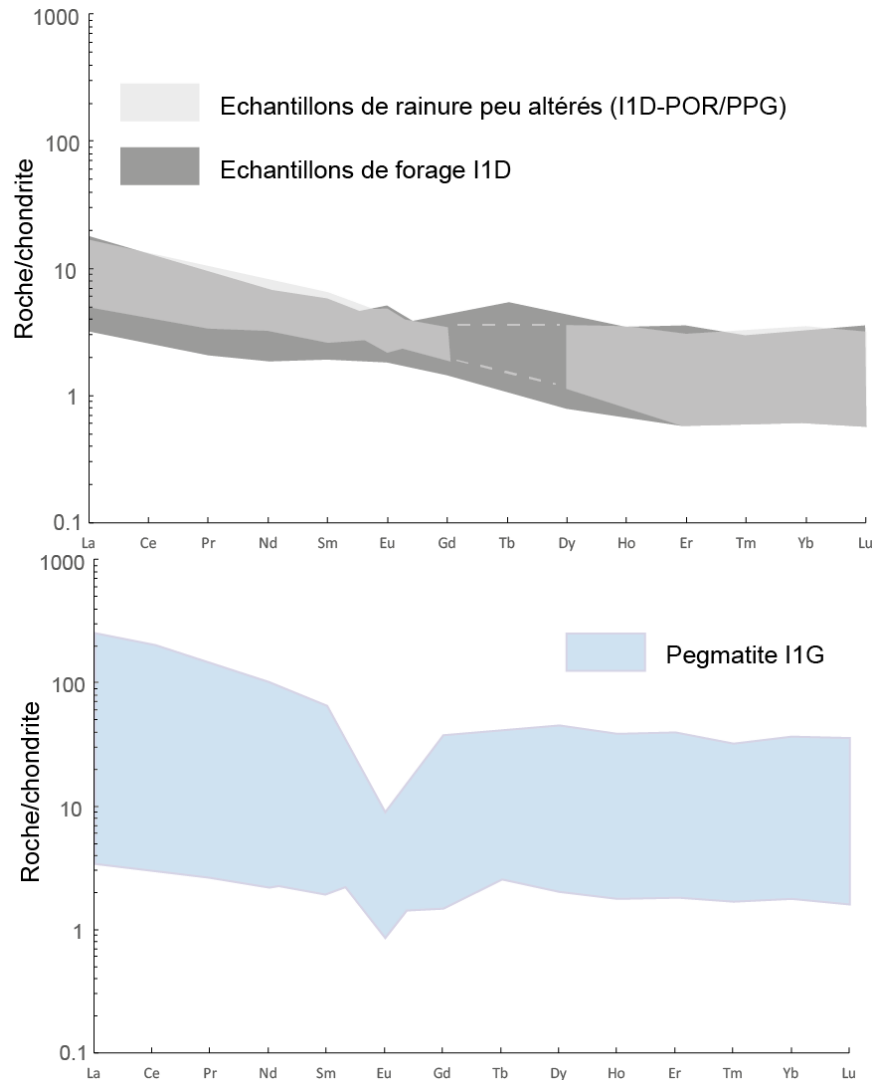


Figure 8. Spectres des éléments des terres rares. A : tonalite de Cheechoo; B : faciès pegmatitique à Cheechoo.

L'intrusion de Cheechoo est étroitement liée à des granites minéralisés de nature pegmatitique. Certaines pegmatites datées (entre 2625 et 2603 Ma) dans le secteur de la mine Éléonore ont le même âge que Cheechoo (2612 Ma). À l'indice aurifère d'Orphée, la datation U-Pb sur monazites d'un granite pegmatitique minéralisé donne un âge à 2613 Ma. Cette intrusion est boudinée et cisailée, suggérant un évènement de déformation post- à syn-intrusion après 2613 Ma (Bogatu, 2016), qui pourrait également être présent au niveau de l'intrusion de Cheechoo localement très déformée.

Une étude de Tkachiev (2011) met en évidence une corrélation entre la mise en place de granites pegmatitiques et les grands cycles orogéniques aux cours des temps géologiques. Il montre une



relation entre les grands cycles de croissance crustale des continents et les différentes générations de pegmatites recensées à travers le monde. Il en ressort notamment un pic d'intensité importante de production de granites pegmatitiques reliés au continent Laurentia, aux alentours de 2625 Ma (Figure 9). Il y a plus de 40 champs de pegmatites recensés pour cette période, ce qui en fait une des périodes la plus importante au cours de l'Archéen pour la production de ce type de faciès.

Cela peut expliquer le grand nombre de pegmatites recensées à la fin du Néoarchéen dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James. Pour un grand nombre de gisements ou d'indices aurifères liés aux intrusions plutoniques, la présence de pegmatite est quasi systématique. C'est particulièrement le cas pour les intrusions archéennes post- à tardi-tectoniques qui sont spatialement, voire génétiquement liées aux pegmatites minéralisées connues sur le territoire.

Est-ce uniquement le reflet d'un biais d'échantillonnage ? Existent-elles partout ailleurs autant dans les zones stériles que fertiles ? Sont-elles toujours là où les occurrences de minéralisations économiques sont les plus probables aux alentours de 2620 Ma ? Cela mériterait un recensement des pegmatites sur le territoire couplé à une étude statistique pour obtenir plus d'éléments de réponse.

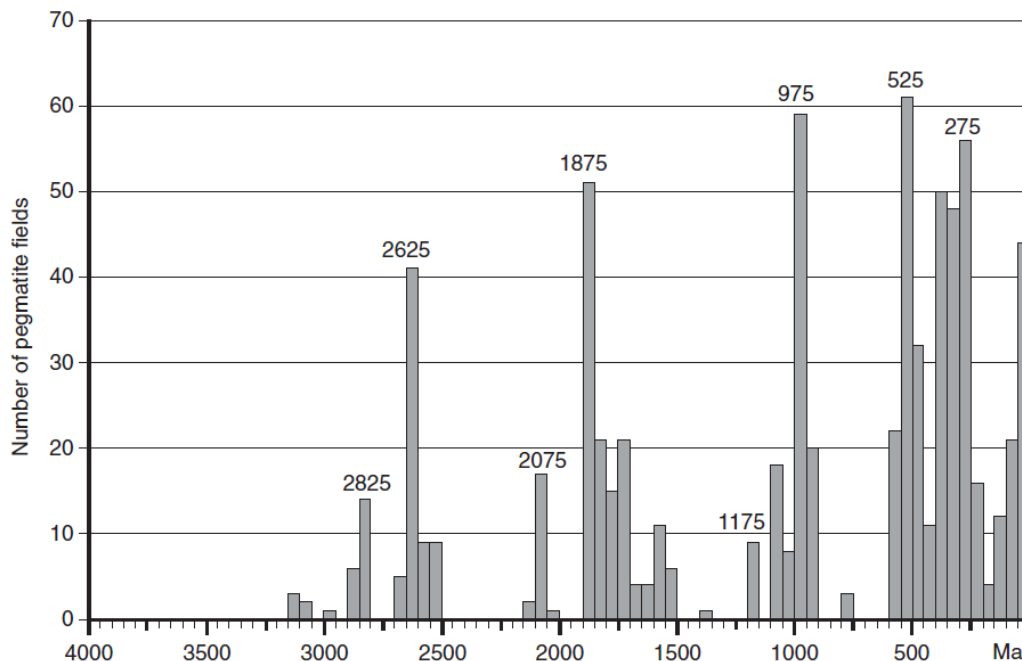


Figure 9. Cyclicité des granites pegmatitiques au cours des temps géologiques. Un des pics principaux à 2625 Ma est relié au recensement de pegmatites sur le bloc Laurasia (Tkachiev, 2011).

3.3 Bilan de masses par modélisation des précurseurs

À Cheechoo, il est difficile de déterminer le protolithe non métasomatisé de façon rigoureuse sur le terrain ou sur la base des analyses lithogéochimiques. Il est donc apparu intéressant d'utiliser la méthode des bilans de masses par précurseurs modélisés. Cette méthode a été décrite de façon détaillée dans plusieurs rapports CONSOREM (projet 2000-2a; Gaboury, 2004; projet 2008-07; Trépanier, 2008).

En résumé, le principe du calcul de bilan de masses est basé sur l'immobilité de certains éléments chimiques au cours du métasomatisme. Il s'agit de prédire la composition en éléments majeurs mobiles d'une roche altérée à partir de ses rapports en éléments immobiles. Le logiciel

LithoModeleur permet cette modélisation par réseaux neuronaux calibrés sur une large banque de données de roches magmatiques fraîches.

Dans cette étude, les éléments chimiques immobiles considérés sont Al_2O_3 , TiO_2 et Zr pour l'utilisation de la méthode sous LithoModeleur pour les échantillons de Cheechoo. Les bilans de masses obtenus en pourcentage sont les bilans de masses relatifs de l'échantillon altéré par rapport à son précurseur. Les bilans de masses sont également disponibles en gain et/ou perte absolus rapportés à 100 g de précurseur. Les valeurs prédites indiquent les teneurs de l'échantillon précurseur pour différents éléments calculés (SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 et Zr).

À partir des éléments majeurs modélisés, un diagramme de Streckeisen (1976) a été réalisé sur la base des normes CIPW calculées à partir des échantillons modélisés (Figure 10). L'enveloppe rose correspond donc au type de roche que devait être le protolithe avant métasomatisme, révélant des faciès granodioritique à granitique (Figure 10). Le faciès dit « tonalitique » déterminé pour Cheechoo sur le terrain au cours des premières campagnes d'exploration n'est donc pas rigoureux ici. Le pluton de Cheechoo se rapproche davantage d'un granitoïde plus évolué. Cependant la modélisation semble mettre en évidence l'existence de plusieurs protolithes traduisant probablement l'existence d'une intrusion polyphasée pour le pluton de Cheechoo. Le diagramme de Middlemost (1985) montre également cette tendance magmatique avec une enveloppe de dispersion des échantillons alignés du domaine granodioritique jusqu'au domaine granitique plus évolué (Figure 11). La modélisation a été effectuée ici sur l'ensemble des échantillons de forages et de rainures (2 475 données) et ces compositions modélisées sont comparées aux compositions initiales de la granodiorite et du faciès porphyrique. La dispersion des échantillons initiaux non modélisés (Figures 10 et 11, enveloppe orange) retranscrit une part des différents types d'altérations qui ont pu affecter l'intrusion, avec des variations de compositions en alcalins et en silice. Les échantillons porphyriques montrent une évolution différente, avec une composition relativement constante en silice mais un gain en alcalin (Na_2O , K_2O). À noter que le faciès le moins évolué semble être le plus affecté par l'altération alcaline.

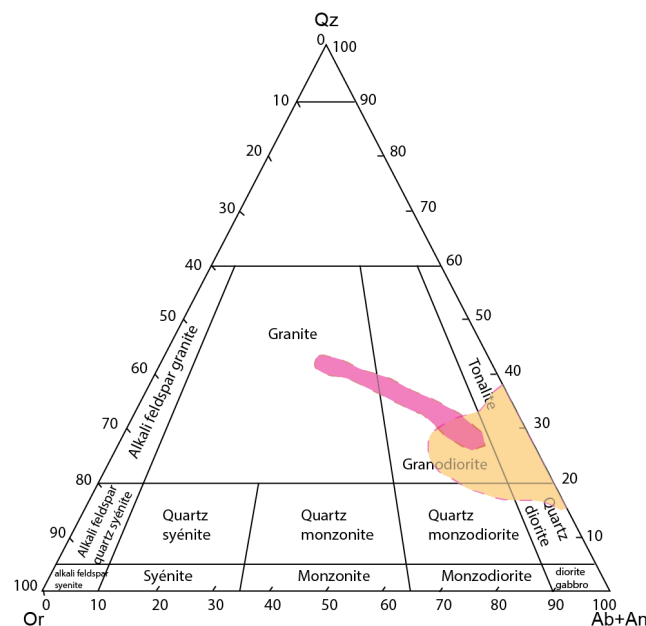


Figure 10. Diagramme de Streckeisen (1976) avec la répartition des échantillons de l'intrusion de Cheechoo 1) non modélisés (enveloppe orange), 2) modélisés (enveloppe rose) selon la méthode des précurseurs modélisés (1 036 échantillons).

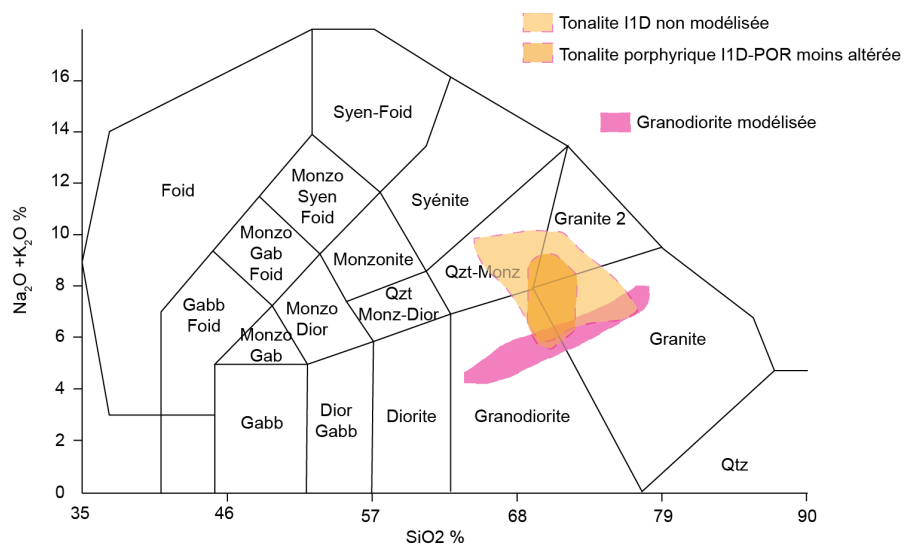


Figure 11. Diagramme de Middlemost (1985) modifié d'après Lafrance (2010) dans LithoModeleur. Comparaison des distributions des compositions modélisées à Cheechoo avec les compositions initiales (forages et rainures). Certains échantillons du faciès porphyrique sont considérés comme étant les moins altérés à Cheechoo (I1D-POR).

D'après le calcul des bilans de masses, le pluton de Cheechoo montre une altération sodique intense, avec des gains absolus moyen en sodium de 5 g pour 100 g de précurseur. Les pertes en calcium et les gains conséquents en sodium peuvent correspondre pour une part à l'albitisation des plagioclases. La perte en fer traduit l'état réduit de l'intrusion, puis la perte en magnésium l'altération d'une partie des biotites observée très nettement en pétrographie. La modélisation effectuée sur les faciès pegmatitiques enregistre également un gain en potassium (3 g pour 100 g) qui va se superposer au gain en sodium, toujours présent même pour les faciès les plus différenciés à Cheechoo (Figure 12).

	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ T	CaO
BM moyen Gain/perte pour 100 g de roche 1037 échantillons granodiorite	5	0	-3	12	-4	-1

	Na ₂ O	K ₂ O
BM moyen Gain/perte pour 100 g de roche 190 échantillons pegmatite	7	3

Figure 12. Tableau synthétique des gains ou pertes moyens absolus pour 100 g de précurseur calculés pour les 1 036 échantillons de granodiorite et les 190 échantillons de pegmatite à partir de la méthode des précurseurs.

Au regard des différents forages, la Figure 13 permet de mettre en évidence des hétérogénéités spatiales dans l'altération avec pour exemple une zone potassique au niveau des forages CH16-091 et CH16-092 associée des valeurs de base en or plus constantes le long du forage CH16-092. Les gains observés en potassium sont également corrélés à des pertes en calcium et des pourcentages plus faibles en sodium. Le forage CH17-095 montre des gains en calcium associés à de fortes teneurs en or (100 g/t) dus à un effet de pépite (30 grains d'or observés dans l'échantillon).



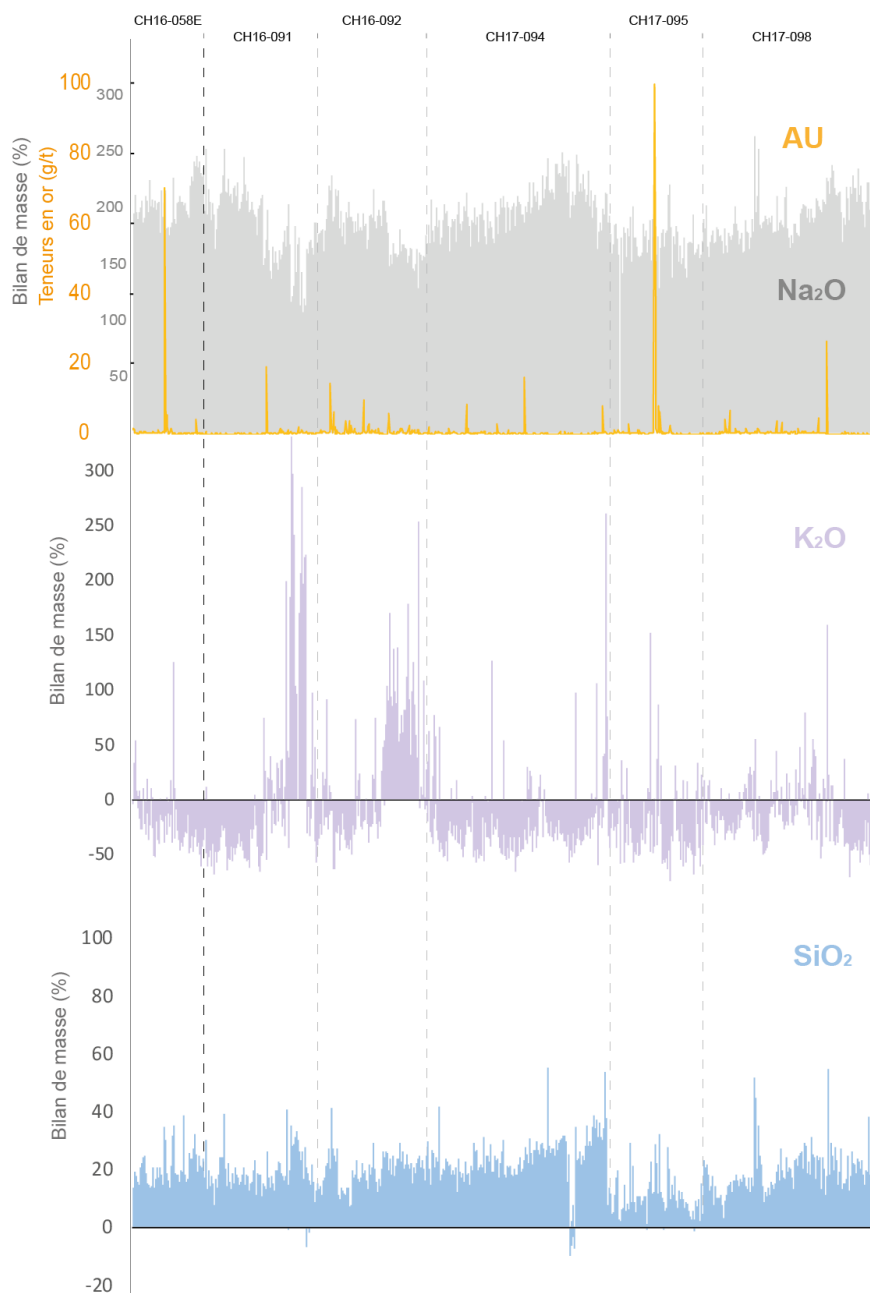


Figure 13. Variations des bilans de masses relatifs (%) en sodium, silice et potassium au regard des teneurs en or (g/t) dans les échantillons de granodiorite des six forages étudiés. L'axe des abscisses représente les différents forages. Pour chaque forage, la profondeur augmente de gauche à droite.

4- Comparaison avec la géochimie des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James

4.1 Éléments majeurs

La signature géochimique de l'intrusion de Cheechoo a été comparée à la géochimie des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James, plus particulièrement les diorites, les tonalites, les granodiorites et les granites issus de la base de données lithogéochimique du SIGÉOM.



Le diagramme des rapports molaires Na/Al vs K/Al de Davies and Whitehead (2011; Figure 14) a été utilisé pour l'ensemble des échantillons de diorite (479 données), de tonalite (1 352 données), de granodiorite (391 données) et de granite (458 données). Il permet d'illustrer les variations chimiques et minérales qui accompagnent les différentes altérations des granitoïdes. Il est certain que l'identification basée sur les variations des rapports molaires doit être également en accord avec les observations pétrographiques.

Sur l'ensemble des diagrammes, on remarque une tendance à l'alignement systématique d'une grande majorité des échantillons aurifères (points jaunes) entre un pôle plagioclase plus ou moins sodique et un pôle séricite, même si quelques échantillons aurifères marginaux sont attirés par le pôle potassique (Figure 14). Cette tendance des échantillons aurifères, ou « *gold trend* », se distingue bien de la distribution dispersée des autres échantillons non minéralisés (points bleus). Elle est particulièrement bien exprimée pour les diorites car il existe beaucoup plus de diorites minéralisées recensées dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James par rapport aux autres granitoïdes (Figure 14A). Les échantillons aurifères alignés supérieurs à 1 000 ppb d'or pour les tonalites correspondent à la tonalite aurifère de La-Grande-Sud, ainsi que la majorité des échantillons entre 200 et 1 000 ppb (Figure 14B). Pour les tonalites, la tendance aurifère observée est donc fortement influencée par les altérations de la tonalite de La-Grande-Sud.

Quelques échantillons géochronologiques repères sont reportés pour chaque diagramme. Il faut noter que l'échantillon du granite du Vieux Comptoir est faiblement aurifère et n'est pas localisé dans le « *gold trend* » plagioclase-séricite mais semble appartenir à la seconde tendance minoritaire influencée par le pôle potassique, tout comme les granites du feuillet 33B12 de la zone de Cheechoo (Figure 14C).

Les échantillons de Cheechoo ont été comparés directement sur le diagramme des granodiorites disponibles dans le SIGÉOM (Figure 15). Il existe très peu de granodiorites aurifères répertoriées dans le SIGÉOM; sept échantillons seulement ont des teneurs entre 10 et 200 ppb. L'ensemble des points montre un alignement entre un pôle plagioclase et un pôle potassique, tout comme le montre la tendance des échantillons non minéralisés pour les granites. La majorité des échantillons de granodiorite à Cheechoo sort nettement de cette tendance, avec une distribution vers un pôle albitique (Figure 15). Cette observation est cohérente avec ce qui a été discuté précédemment à partir du calcul des bilans de masses. La répartition des quelques échantillons vers le pôle potassique correspond aux échantillons de pegmatites. Les calculs de bilans de masses ont là encore montré un gain en potassium pour les faciès pegmatitiques à Cheechoo. L'intrusion granodioritique de Cheechoo se distingue bien des autres granodiorites de la région mais également de la majeure partie des tonalites d'Eeyou Istchee Baie-James. Le faciès porphyrique semble légèrement moins impacté par l'altération sodique mais la distribution montre tout de même la présence d'une altération non négligeable.

Le diagramme de peralcalinité basé sur l'indice de saturation en aluminium (indice de Shand; A/CNK) permet de discuter du caractère métalumineux/peralumineux des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James en fonction de leur différenciation magmatique basée sur les variations du rapport Zr/Ti (Figure 16). Il s'agit de calculer, à partir des compositions initiales modélisées, le rapport molaire de l'aluminium versus la somme des alcalins ($\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

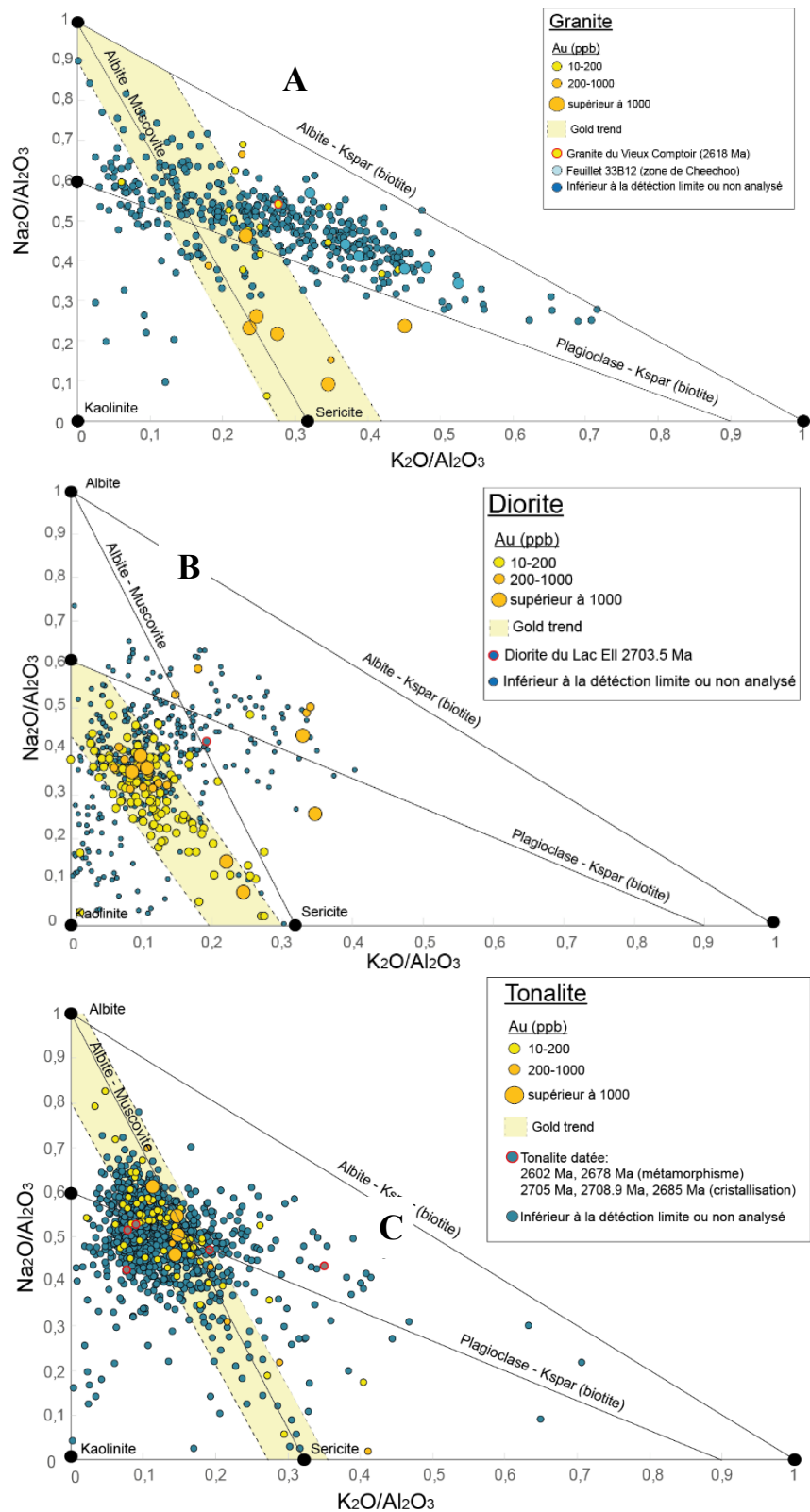


Figure 14. Diagramme d'altération de Davies and Whitehead (2011) pour les granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (SIGÉOM). A : diorites; B : tonalites; C : granites.



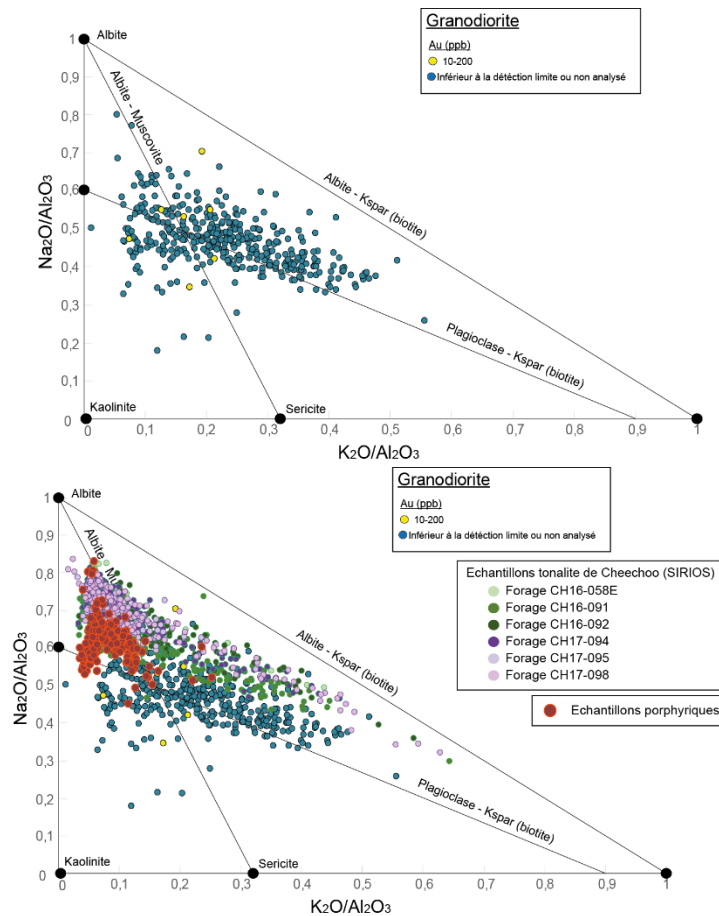


Figure 15. Diagramme d'altération de Davies et Whitehead (2011) pour les granodiorites d'Eeyou Istchee Baie-James et comparaison avec les signatures hydrothermales de la granodiorite, de la granodiorite porphyrique et des faciès pegmatitiques à Cheechoo.

La composition de la tonalite de La-Grande-Sud modélisée montre une composition à tendance peralumineuse, très proche de celle de Cheechoo avec un indice de saturation de l'aluminium entre 1,05 et 1,33 (Figure 16A). Les échantillons modélisés de Cheechoo montrent des compositions très peralumineuses (0,95 à 1,89) avec une dispersion linéaire des points, reflétant possiblement la différenciation magmatique. Une part de cet aspect aligné des échantillons modélisés, qui se retrouve également dans le diagramme de Middlemost (Figures 11 et 16A), pourrait être due à un effet de la méthode des précurseurs modélisés.

En contexte tardi-orogénique extensif de zone collisionnelle, les intrusions granitiques tardi-orogéniques liées aux minéralisations aurifères sont généralement riches en potassium et silice et en majorité pauvres en calcium, avec une tendance peralumineuse (Gloaguen, 2006). Dans la classification de Chappell et White (1992), ces granitoïdes appartiennent essentiellement au type S et à la série à ilménites de Ishihara (1977), issus de la fusion partielle de roches alumineuses de la croûte moyenne épaissie. Le cas particulier pour Cheechoo est qu'il s'agit d'une intrusion peralumineuse riche en sodium dans laquelle le potassium s'exprime plutôt au niveau des faciès pegmatitiques mais aussi au niveau des roches métasédimentaires avec la présence de microcline et de biotite.

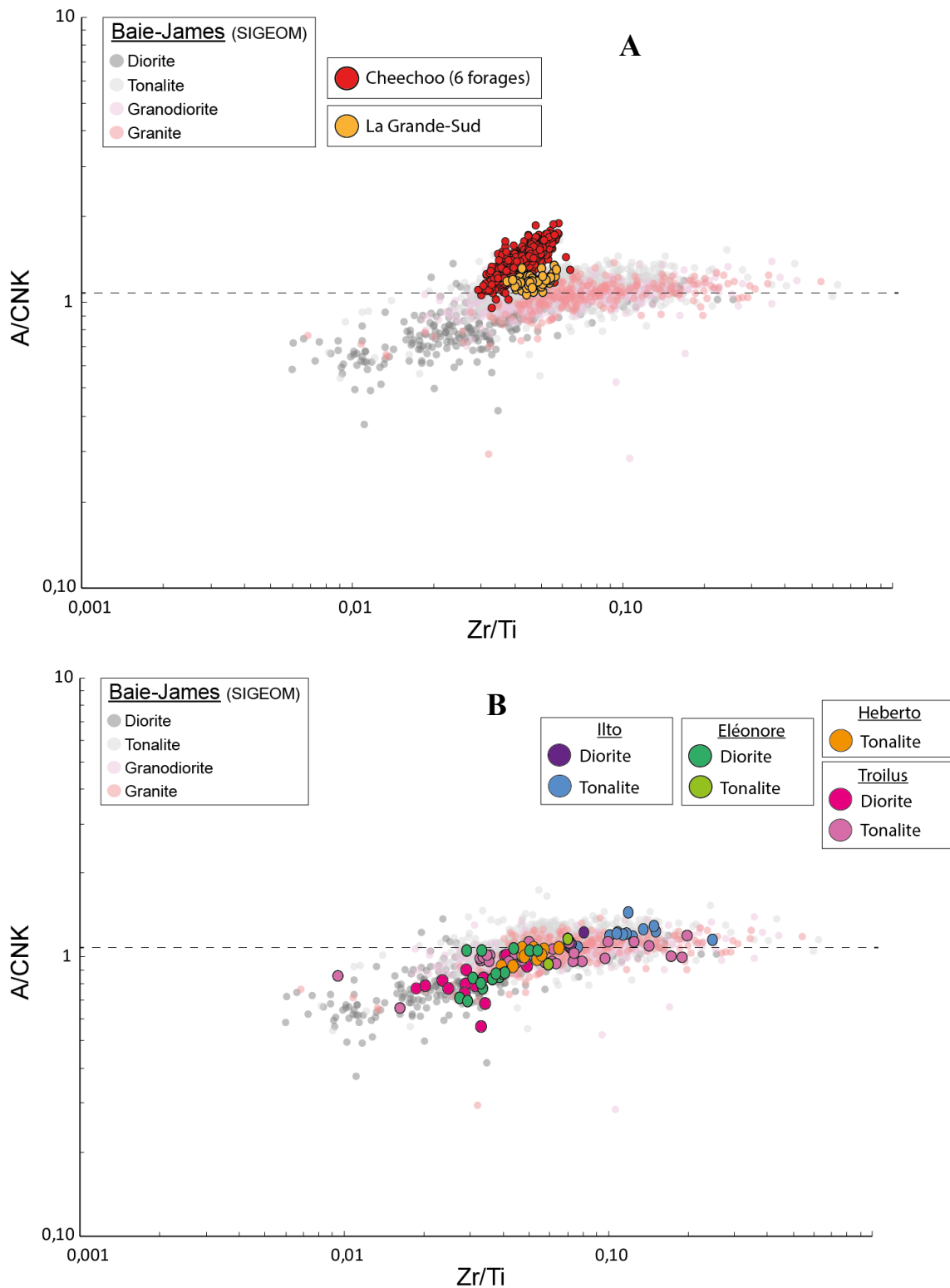


Figure 16. A : Diagramme de peralcalinité illustrant les compositions peralumineuses de l'intrusion de Cheechoo (Ressources Sirios) et de La-Grande-Sud (MERN) au regard de l'ensemble des données modélisées des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (SIGÉOM); B : Comparaison des signatures géochimiques modélisées des intrusions dioritiques et tonalitiques pour les indices aurifères Ilto (Osisko) et Héberto (Dios, Blu, 2017), les gisements Éléonore (Goldcorp) et Troilus (Troilus Gold) avec la signature magmatique régionale.



L'origine du caractère peralumineux à Cheechoo pourrait être le résultat de la fusion partielle de roches métasédimentaires qui contribuent à l'enrichissement en aluminium. Cependant cet enrichissement peut être relatif par rapport à une perte en alcalin, notamment en potassium et/ou calcium.

Cependant, les travaux de Chappell *et al.*, (2012) dans le sud de l'Australie montrent la possibilité de générer des granites de type I à compositions peralumineuses à partir de la fusion partielle de roches à compositions métalumineuses. Des études expérimentales montrent que les liquides issus de la fusion partielle de roches basaltiques à andésitiques, à des pressions inférieures au champ de stabilité du grenat, sont majoritairement peralumineux. L'excès d'aluminium issu de la fusion des biotites et des amphiboles est incorporé dans le liquide felsique. À partir d'un même protolithe, les différentes conditions de fusion partielle puis de cristallisation fractionnée à faible profondeur dans la croûte permettraient d'expliquer les relations co-génétiques entre les granites de type I métalumineux d'une part et peralumineux d'autre part au Sud de l'Australie (Figure 17).

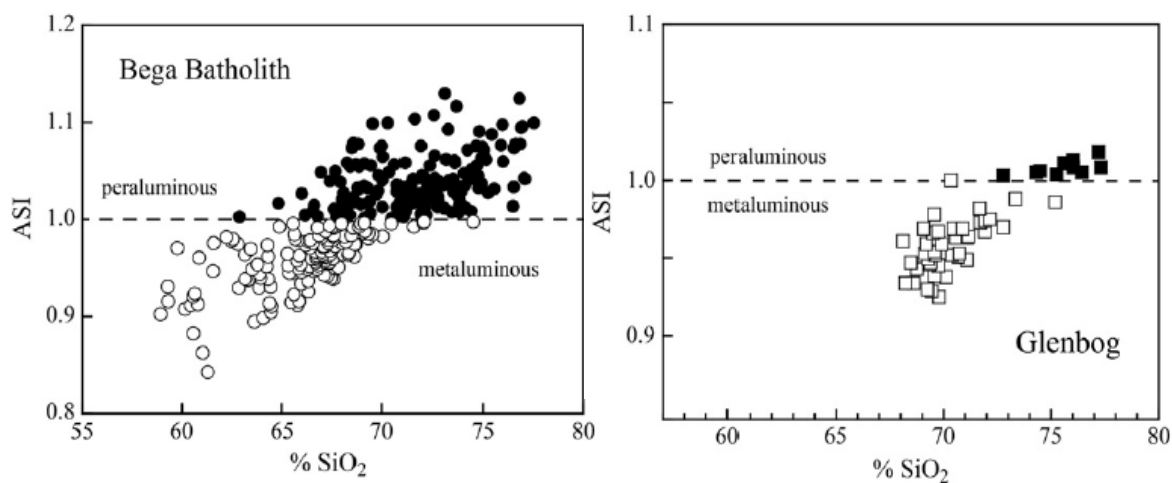


Figure 17. Diagrammes de peralcalinité tirés de Chappell *et al.*, (2012), illustrant la relation co-génétique entre des granites de type I métalumineux et peralumineux d'intrusions felsiques dans le sud de l'Australie (Bega batholith et Glenbog Suite).

La question qui peut se poser pour la région d'Eeyou Istchee Baie-James est de savoir si les granitoïdes peralumineux, qu'ils soient issus de roches ignées et/ou sédimentaires, sont davantage propices aux minéralisations aurifères. Les intrusions aurifères de Cheechoo et de La-Grande-Sud en sont un bel exemple. Cette évaluation géochimique a également été regardée pour l'indice aurifère Ilto au contact Opinaca-La Grande dans le feuillet 33G06 (propriété d'Osisko), sur des échantillons de diorite et de tonalite de la mine Éléonore (Rapport GM70043; Fournier, 2017), pour l'indice Héberto (Blu, 2017) et pour le gisement de Troilus (Figure 16B).

Sur une base de 27 échantillons (Osisko), le calcul de bilan de masse via la méthode des précurseurs modélisés dans LithoModeleur montre des gains importants de fer et calcium, et des pertes en potassium et variables en silice. Les bilans de masse en sodium montrent des gains relatifs légers jusqu'à 40 % pour 19 échantillons de tonalite et jusqu'à 26 % pour 7 échantillons de diorite. Les faciès tonalitiques et dioritiques sont affectés par les mêmes altérations. Le diagramme de peralcalinité (Figure 16B) montre une tendance peralumineuse pour la majorité des échantillons modélisés de tonalite mais aussi pour certains de diorite avec des rapports Zr/Ti plus élevés que ceux de Cheechoo et La-Grande-Sud. On pourrait suggérer une évolution magmatique de composition dioritique métalumineuse à tonalitique peralumineuse pour les intrusions felsiques du pluton de Le Moyne (indice Ilto).

Lorsqu'on regarde les échantillons de tonalite et diorite à Éléonore, on remarque des compositions métalumineuses pour une majorité des échantillons de diorite, avec une légère évolution vers une tendance peralumineuse pour la tonalite. L'intrusion dioritique du Lac Ell à proximité d'Éléonore est datée à 2705,6 Ma (Ravenelle *et al.*, 2008). On pourrait imaginer une évolution géochimique de la diorite de type I bien marquée à Éléonore vers des compositions dioritiques/tonalitiques peralumineuses que l'on retrouve à Ilto, toujours au contact des deux grandes sous-provinces d'Eeyou Istchee Baie-James.

Les échantillons de tonalite d'Héberto montrent une tendance métalumineuse. La distribution des échantillons de diorite et tonalite de Troilus se superpose à l'évolution magmatique régionale, avec des compositions peralumineuses pour les tonalites les plus différenciées.

Il pourrait ainsi se dégager deux évolutions magmatiques différentes dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James au regard de la distribution des différents échantillons de granitoïdes aurifères. Une première évolution pourrait correspondre à une évolution magmatique continue de faciès dioritique vers des faciès tonalitiques issus de la fusion partielle d'un protolithe de type igné (TTG) et être associée à la formation de ceintures de roches vertes. Les tonalites peralumineuses seraient alors de type I, plutôt que de type S, au même titre que ce qui est observée dans le sud de l'Australie pour certains plutons granitiques (Figures 16B et 17).

Une seconde évolution serait représentée par des compositions peralumineuse plus prononcées avec les intrusions anormales de Cheechoo et La-Grande-Sud (Figure 16A) qui pourrait être issue en partie de la fusion partielle de roches alumineuses (possiblement métasédimentaires ?).

Sur le diagramme de Middlemost (Figure 18), le champ modélisé de la tonalite de La-Grande-Sud tombe dans le champ de la granodiorite modélisée de Cheechoo, ce qui ajoute un point commun supplémentaire entre ces deux intrusions aurifères. Le champ de la tonalite à Éléonore concorde avec celui de la tonalite d'Héberto.

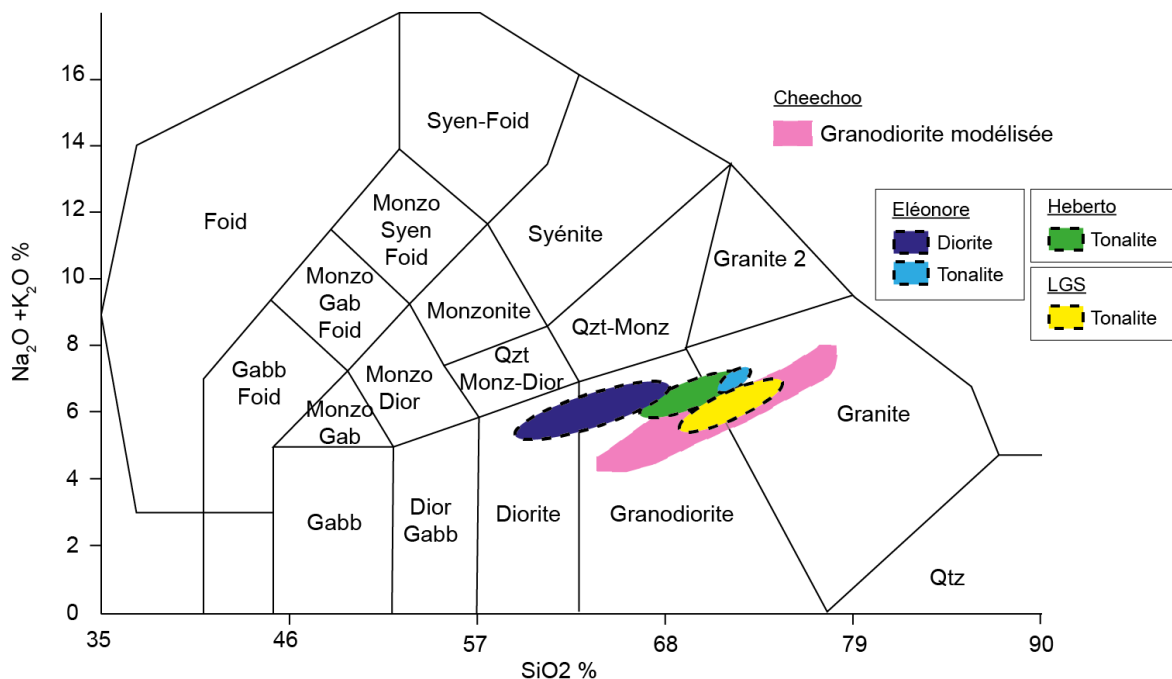


Figure 18. Diagramme de Middlemost (1985) modifié d'après Lafrance (2010) dans LithoModeleur. Comparaison des distributions des compositions modélisées à Cheechoo avec les compositions modélisées des intrusions dioritique et tonalitique d'Éléonore, Héberto et La-Grande-Sud.



4.2 Éléments traces

La distribution des terres rares a également été étudiée pour l'ensemble des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James. Le diagramme La/Yb vs (Eu/Eu*) permet de visualiser assez rapidement les différences des granitoïdes peu évolués à évolués en terme de fractionnement des REE et d'anomalies positives ou négatives en europium (Figure 19).

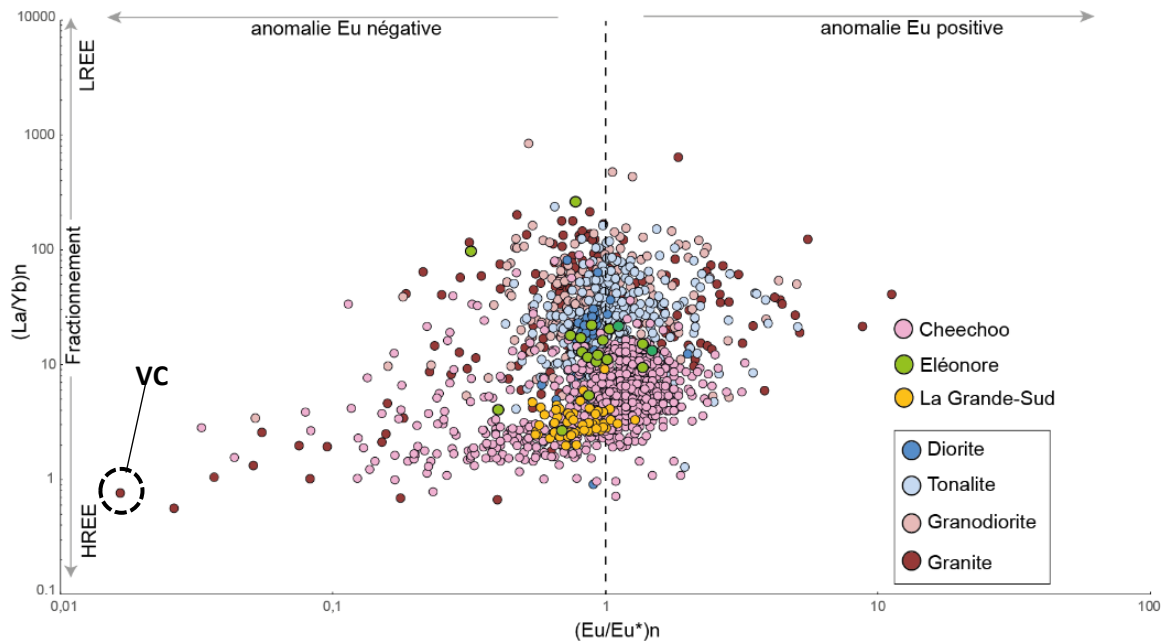


Figure 19. Variations du rapport $(La/Yb)_n$ en fonction du rapport $(Eu/Eu^*)_n$ des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James (SIGÉOM) au regard des compositions en REE de la tonalite de La-Grande-Sud (feuillet 33F10, SIGÉOM) et de l'intrusion de Cheechoo (Ressources Sirios). VC : Vieux Comptoir.

Au premier coup d'œil on remarque que la signature REE de la tonalite de La-Grande-Sud (points jaunes), se distinguent du reste des tonalites d'Eeyou Istchee Baie-James, avec la présence d'anomalies légèrement négatives en europium, c-à-d. $(Eu/Eu^*)_n < 1$ et des teneurs faibles en REE. Les échantillons de la tonalite de La-Grande-Sud tombent dans le champ de la granodiorite de Cheechoo. Au regard de l'ensemble des compositions REE des granitoïdes, les intrusions de Cheechoo et La-Grande-Sud ont une signature particulièrement appauvrie en REE.

À Eléonore, la majorité des diorites (vert clair) se superpose au champ REE des diorites d'Eeyou Istchee Baie-James (en bleu foncé). Les échantillons d'Eléonore ont des compositions plus riches en terres rares légères que les échantillons de Cheechoo, comme le montre la Figure 20 avec des spectres plus fractionnés. Un spectre de tonalite à Eléonore montre une anomalie positive en europium, comme celle identifiée sur la plupart des spectres de Cheechoo (Figure 20).

L'ensemble des échantillons de Cheechoo (en rose) à l'extrême gauche du diagramme avec les anomalies en europium les plus faibles ($0,01 < Eu/Eu^* < 0,5$) correspond aux échantillons de pegmatite. Les faciès pegmatitiques montrent des compositions plus différenciées, avec des anomalies négatives en europium plus importantes, comme vu précédemment (cf. 2.2). Le point extrême gauche symbolisé VC est l'échantillon géochronologique du Vieux Comptoir daté à 2618 Ma.

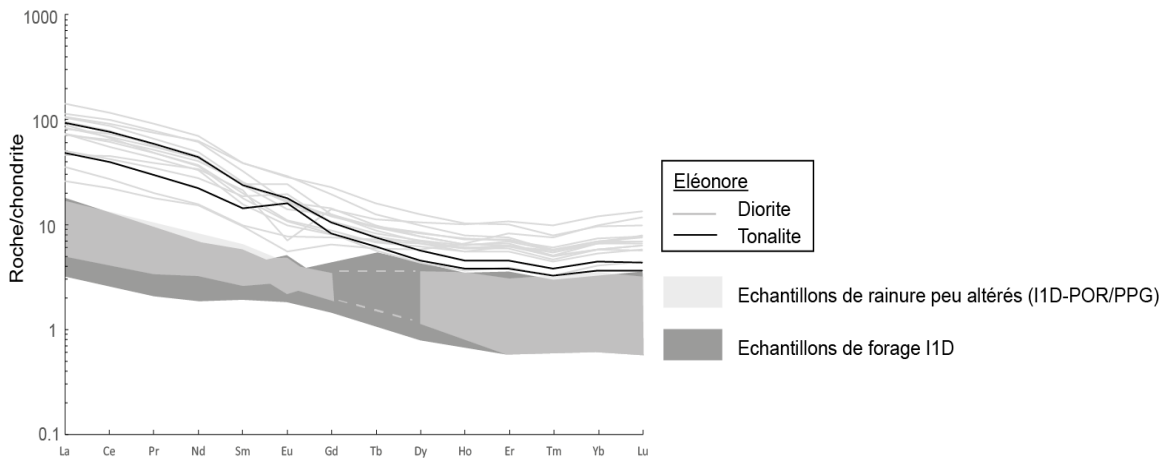


Figure 20. Comparaison des spectres REE entre Éléonore (Goldcorp) et Cheechoo (Ressources Sirios).

À l'échelle d'Eeyou Istchee Baie-James, on observe des similitudes entre certaines signatures de terres rares sur quelques échantillons lithogéochimiques datés par géochronologie (Figure 21). Par exemple, le spectre REE du dyke de tonalite daté à 2649 Ma (en bleu, Figure 21), au Nord-Est d'Eeyou Istchee Baie-James, a exactement la même signature que certains échantillons de Cheechoo. Le granite du Vieux Comptoir présente deux signatures différentes en fonction de son âge de mise en place (en rouge, Figure 21) : sa phase datée à 2633-2655 Ma montre un spectre REE plus fractionné et enrichi en LREE avec une anomalie négative en europium moins intense que le faciès le plus tardif (2618-2613 Ma). La pegmatite aurifère à Orphée datée à 2613 Ma a la même signature que le granite daté à 2618 Ma et ils appartiennent tous deux à la suite du Vieux Comptoir. Les travaux de Morfin (2014) montrent également des spectres en mouettes pour les injections de dykes de leucogranites dans le complexe de Laguiche (feuille 33B12, 33B13), comparables au Vieux Comptoir.

Les spectres REE correspondant à des tonalites-granodiorites datées entre 2699 Ma et 2678 Ma (en noir, Figure 21) montrent des signatures similaires avec un fractionnement intense entre les LREE et les HREE, sans anomalie en europium, comparable aux intrusions du pluton d'Opinaca. Ce sont des spectres comparables à la signature des séries TTG à l'Archéen.

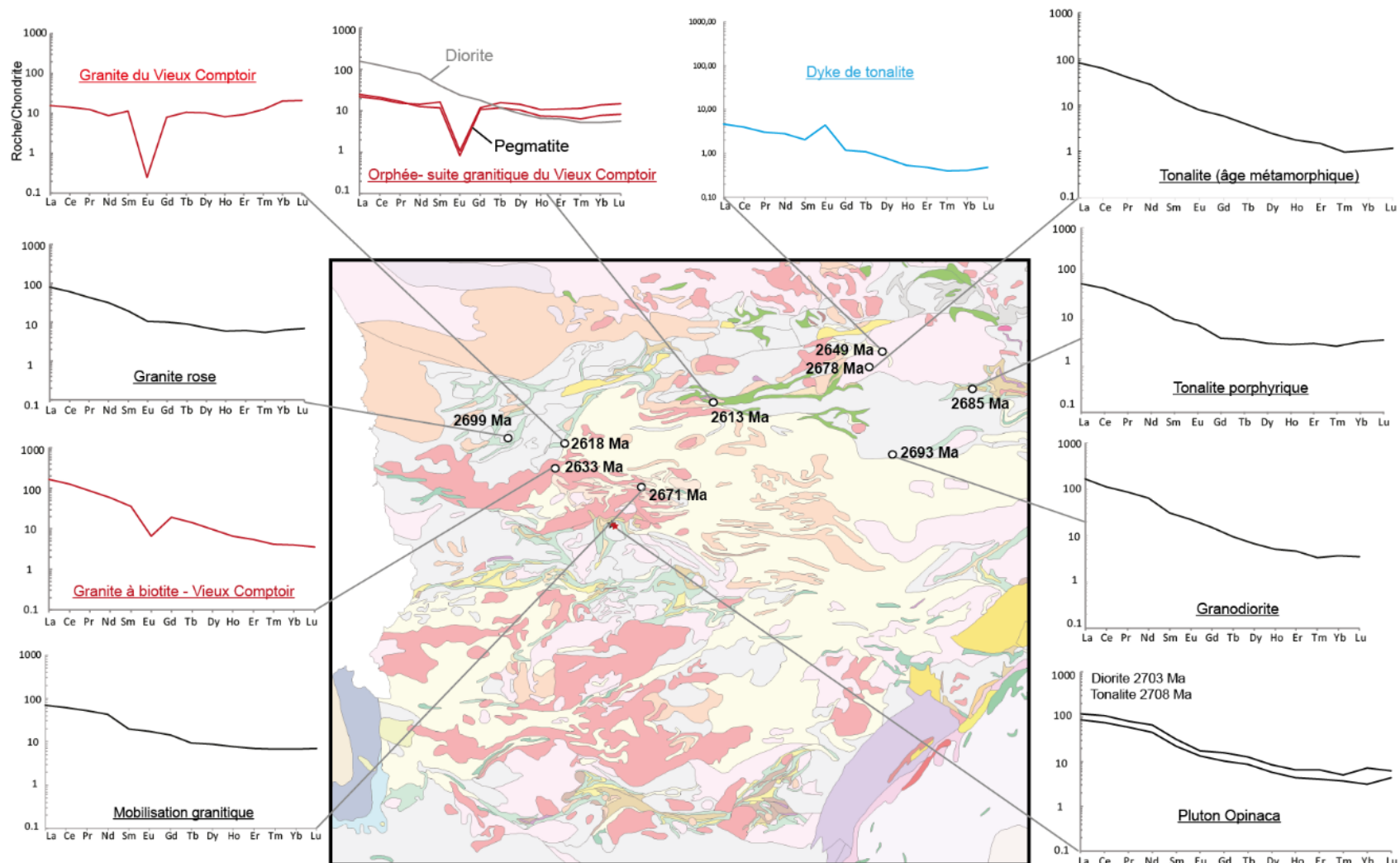


Figure 21. Carte géologique régionale d'Eeyou Istchee Baie-James (SIGÉOM) et comparaison des spectres de terres rares d'échantillons géochronologiques.



5- Calculs des pressions de cristallisation

La détermination des pressions de cristallisation des intrusions granitiques a pour intérêt de nous aider à mieux contraindre l'évolution plutonique régionale. Elle permet d'établir un lien direct avec la profondeur de mise en place des plutons, et ainsi fournir indirectement des informations sur l'évolution tectonique régionale, de la cristallisation en profondeur à l'Archéen jusqu'à aujourd'hui. Il existe également un second intérêt impliquant directement les modèles d'exploration. En effet, les systèmes plutoniques de faibles pressions de cristallisation, donc de faible profondeur, peuvent être génétiquement reliés avec des systèmes de type porphyre (p. ex. les porphyres à Cu-Au).

5.1 Principe de la méthode

Les travaux de Yang (2017) proposent deux équations permettant d'estimer les pressions de cristallisations d'intrusions granitiques. Ces équations reposent sur des observations empiriques qui montrent l'existence d'une corrélation entre les teneurs en silice d'un magma siliceux et les pressions de cristallisation, d'après le programme rhyolite-MELTS (Gardner et al., 2014; Gualda et al., 2012; Gualda et Ghiorso, 2013; 2015), mais aussi d'après des travaux expérimentaux (Rollinson, 1993).

$$P = -0,2426*(Qtz)^3 + 26,392*(Qtz)^2 - 980,74*(Qtz) + 12\,563$$

$$P = 0,2426*(Ab + Or)^3 - 46,397*(Ab + Or)^2 + 2981,3*(Ab + Or) - 64\,224$$

Qtz : norme CIPW du quartz recalculée à 100 %

Ab : norme CIPW de l'albite recalculée à 100 %

Or : norme CIPW de l'orthose recalculée à 100 %

P : pression en MPa

Cette méthode est très simple d'utilisation, basée sur l'analyse des éléments majeurs en roches totales. La méthode implique d'utiliser le calcul des normes CIPW du quartz, de l'albite et de l'orthose et de recalculer le tout à 100 % avant d'utiliser les équations.

5.2 Limites de la méthode

L'auteur a testé la méthode sur l'intrusion granodioritique du Lac Georges au Nouveau-Brunswick et sur le pluton Harrison Pass au Nevada, puis l'a comparé à la méthode du géo-baromètre Al-hornblende (Hammarston et Zen, 1986; Johnson et Rutherford, 1989). Les résultats obtenus montrent de légères différences ($R^2 = 0,7689$), avec des pressions toujours plus faibles avec la méthode de Yang (2017). Il suggère que les pressions plus faibles représentent les pressions de cristallisation du pluton alors que les pressions obtenues par le géobaromètre Al-hornblende traduisent les pressions de cristallisations des premières générations de hornblende au cours de l'histoire des deux intrusions granitiques.

L'étude de Yang (2017) montre également une corrélation entre les pressions de cristallisation des magmas granitiques et les normes CIPW du quartz. Cependant, les équations sont valides si et seulement si la roche de départ contient plus de 60 % de SiO_2 en roche totale ainsi qu'une norme CIPW du quartz, recalculée à 100 %, entre 15 et 40 %. Au-delà de 40 %, les pressions obtenues deviennent négatives tandis que pour une norme CIPW inférieure à 15 %, les pressions seront



exceptionnellement élevées (> 3000 MPa). Ces limites permettent ainsi de rester dans un contexte géologique cohérent.

L'auteure précise bien que d'autres tests seraient à effectuer afin de mieux contraindre la méthode sur plusieurs granitoïdes naturels. Plus de tests expérimentaux sont également suggérés afin de mieux comprendre les effets du fluor et du CO₂, par exemple, sur le système. L'influence des variations des concentrations en CaO, FeO et MgO sur le calcul des pressions de cristallisation devrait aussi être mieux défini.

L'estimation des erreurs sur les calculs de pressions est de ce fait encore peu contrainte. Pour la méthode du géobaromètre Al-hornblende (Hammarstrom et Zen, 1986), il existe, d'après la littérature, une erreur d'environ ± 3 kbar sur les calculs de pressions, ce qui est assez significatif.

5.3 Calibration et vérification

Yang (2017) a établi ses équations principalement pour des granitoïdes évolués. Dans le cadre de ce projet, nous avons décidé de mieux contraindre l'utilisation de cette méthode et de la tester sur plusieurs types de granitoïdes, des moins évolués (diorite) vers les plus évolués (tonalite, granodiorite et granite). Le test s'est basé sur des plutons en Abitibi, dont les pressions de cristallisation ont été déterminées par la méthode du géobaromètre Al-hornblende (Feng et Kerrich, 1990; 1992; Hammarstrom et Zen, 1986; Johnson et Rutherford, 1989).

Le comparatif entre les résultats de pressions obtenus en fonction des deux méthodes distinctes pour différents types de granitoïdes est illustré dans le tableau ci-dessous (Figure 22). La méthode fonctionne bien pour les compositions de type TTG et granite à deux micas, mais elle ne fonctionne plus pour les compositions de type monzonite et syénite. Dans les deux cas, la norme CIPW de l'orthose est très élevée (59 à 66 %) par rapport à la norme CIPW du quartz (19 à 23 %), ce qui révèle une composition à dominante potassique. Ce type de composition paraît donc inadapté aux équations de Yang (2017). De plus, les concentrations en silice dans les intrusions de type syénite sont parfois inférieures à 60 % de SiO₂, ce qui n'est pas compatible avec les conditions d'utilisations de la méthode de Yang (2017).

	Faciès tonalitique Batholite Round Lake	Granite à muscovite Preissac-Lacorne	TTG Bourlamaque	Monzonite, monzodiorite Batholite Round Lake
Baromètre Al-hornblende* Feng et Kerrich (1990)	5 kbar	3 à 5 kbar	~1 kbar	3.3 à 7.2 kbar
Méthode Yang (2017)** P(Qz)	473 MPa (4.73 kbar)	291 à 421 MPa (2.91 à 4.21 kbar)	194 MPa (1.94 kbar)	893 à 1587 MPa (8.93 à 15,87 kbar)

* Hammarstrom et Zen, 1986: ± 3 kbar d'erreur

** erreur sur le calcul mal contrainte

Figure 22. Tableau comparatif entre les deux méthodes de calculs de pression de cristallisation. Les calculs de pressions avec la méthode de Yang (2017) ont été effectués à partir des données géochimiques de Feng et Kerrich (1992) en Abitibi.

Des tests sur les diorites ont également été effectués afin de jauger l'importance des concentrations en CaO sur le calcul de pressions. Dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, une diorite contient en moyenne 5 % de CaO en analyse de roche totale contrairement à un granitoïde plus évolué qui lui va contenir de 1 à 2 % de CaO en moyenne (concentrations également observées sur des granitoïdes en Abitibi). On remarque que les pressions calculées sur des diorites montrent des gammes de pressions toujours plus élevées que les granitoïdes plus évolués. Pour une même composition dioritique en éléments majeurs sur roche totale, si on modifie



la concentration en CaO de 1 % à 5 %, le calcul de la norme des feldspaths est directement impacté et va augmenter. Les pressions obtenues vont être environ 3 fois supérieures pour une concentration à 5 % de CaO, ce qui explique la tendance observée dans les diorites. Les équations ne sont donc pas adaptées aux diorites. Il est nécessaire qu'il n'y ait pas trop de calcium dans le système, et cela confirme le fait que ces équations soient valables pour des granitoïdes évolués, comme le précise Yang (2017).

5.4 Application aux granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James

Les pressions de cristallisation ont été calculées pour trois types de granitoïdes selon la classification du SIGÉOM : les tonalites, les granodiorites et les granites. L'ensemble des pressions a été calculé sur la base des précurseurs modélisés pour chaque échantillon afin de s'affranchir des effets de l'altération sur le calcul.

Les cartes de répartition des pressions calculées sont illustrées sur la Figure 23. Il n'a pas été possible de calculer les pressions de cristallisation sur l'ensemble des échantillons de granitoïdes disponibles dans la base de données du SIGÉOM du fait des limitations de la méthode. Les points de pressions illustrés en couleur sur les cartes (Figure 23) sont donc uniquement les échantillons de granitoïdes dont les pressions ont pu être calculées dans le respect des conditions d'utilisations des équations de Yang (2017). Au total, un peu plus de 1 000 pressions ont pu être calculées pour les granitoïdes évolués d'Eeyou Istchee Baie-James.

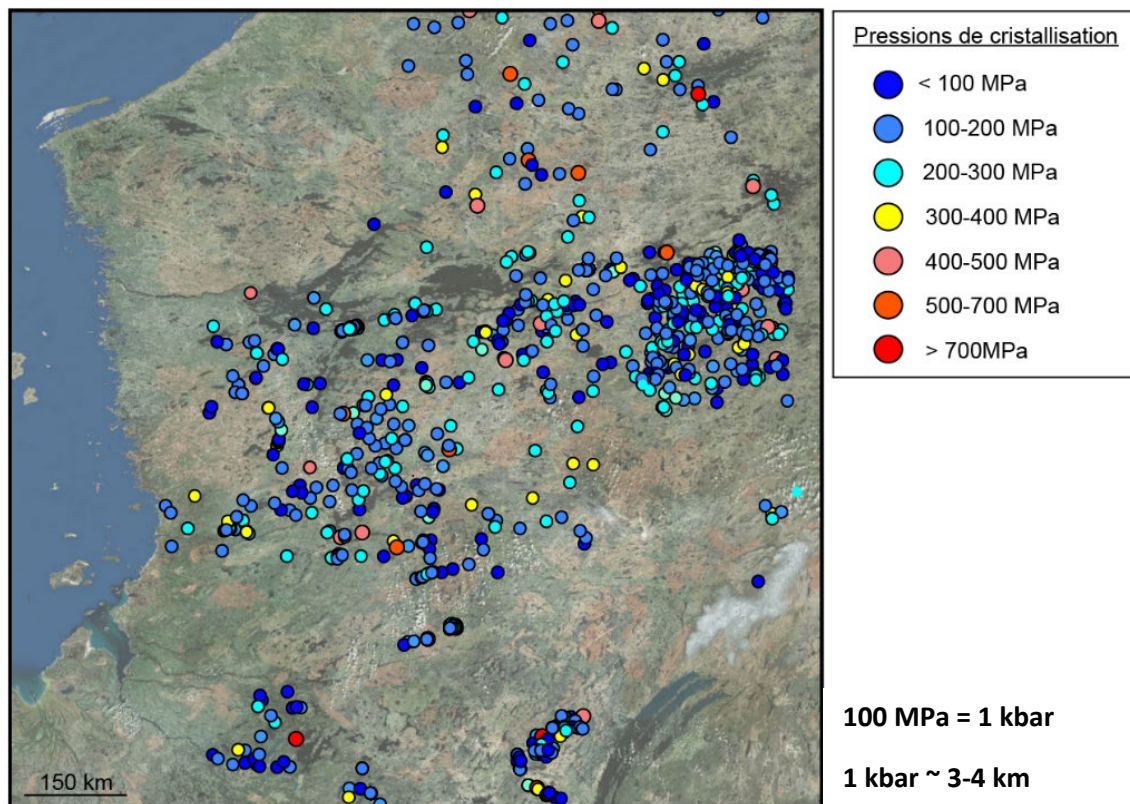


Figure 23. Distribution globale des pressions de cristallisation pour les granitoïdes (tonalite, granodiorites et granites) d'Eeyou Istchee Baie-James.

Les cartes de répartition des pressions en fonction des granitoïdes montrent des pressions globalement plus élevées pour les échantillons de granodiorites au nord de la Sous-province de



La Grande jusqu'à la Sous-province de Minto (Figure 24). Une grande majorité des pressions sur les faciès granitiques montre des pressions faibles, inférieures à 300 MPa. L'échantillonnage des faciès tonalitiques est plus conséquent et permet de visualiser des hétérogénéités au niveau de la stratégie d'échantillonnage. Cependant, là encore, une grande majorité montre des pressions inférieures à 300 MPa, soit un équivalent en profondeur inférieur à 10 km, ce qui est cohérent avec un contexte de mise en place syn-volcanique pour une certaine partie des tonalites d'Eeyou Istchee Baie-James (secteur de Duncan, la Grande-Sud, etc.). Dans le détail, les pressions ont été calculées pour certains échantillons géochronologiques et sont présentées sur la Figure 25. La pression la plus faible correspond au granite du Lac Taylor à 2699 Ma et celle la plus élevée, à la tonalite du pluton de Wabamisk à 2705 Ma. La tonalite du pluton d'Opinaca, datée à 2708,9 Ma, se met en place à une pression de 1 kbar, ce qui est équivalent à environ 3-4 km de profondeur. Parmi l'ensemble des échantillons géochronologiques, il n'a pas été possible de déterminer de pressions pour le granite du Vieux Comptoir daté à 2618 Ma, car la norme CIPW du quartz recalculée à 100 % à partir des teneurs modélisées est supérieure à 40 %.

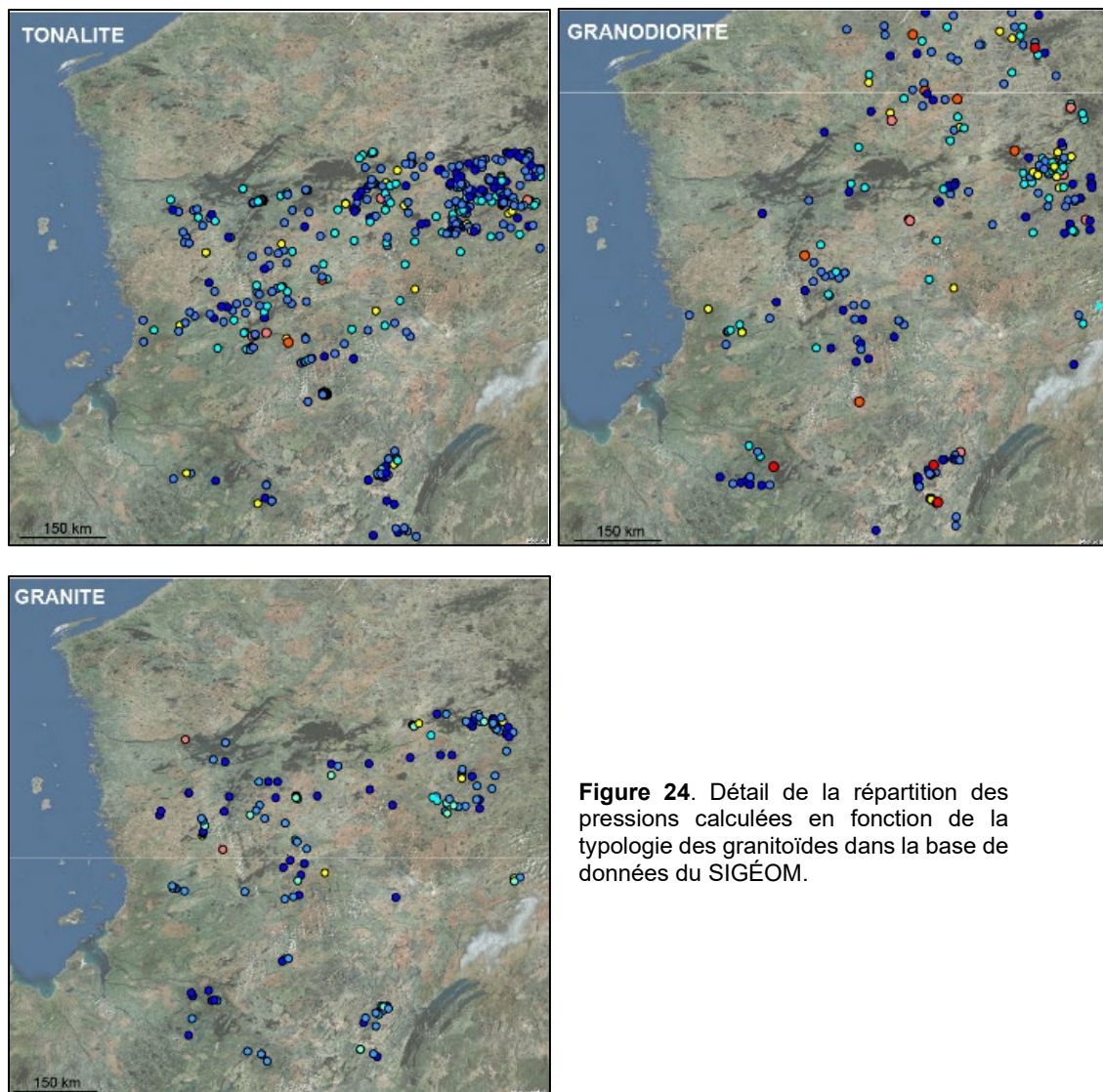


Figure 24. Détail de la répartition des pressions calculées en fonction de la typologie des granitoïdes dans la base de données du SIGÉOM.

Age (Ma)	Lithologie	Pression Qz (kbar)
2747	Tonalite gneissique de la pêche	2.06
2745.5	Tonalite pluton d'Elmer	1.02
2726	Tonalite pluton de Nochet	1.09
2716	Tonalite d'Amisach Wat	1.24
2708.9	Tonalite pluton d'Opinaca	1.01
2708	Granite pluton de Sauvolles	1.02
2705	Tonalite pluton Wapamisk	2.38
2699	Granite du Lac Taylor	0.7
2671.8	Granodiorite pluton de Rotis	0.79

Figure 25. Tableau des âges de cristallisation des granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James en fonction des pressions de cristallisation.

5.5 Application au pluton de Cheechoo

Pour le calcul de pressions sur les échantillons de Cheechoo, il a été question de s'affranchir également des effets de l'altération et/ou du métasomatisme sur le calcul. La composition de l'ensemble des échantillons du faciès granodioritique (1 037 échantillons) a été recalculée via la méthode des précurseurs modélisés. Le calcul des minéraux normatifs a donc été effectué à partir des teneurs modélisées.

La norme CIPW recalculée à 100 % du quartz varie entre 42 et 58, celle de l'albite entre 27 et 43 puis celle de l'orthose entre 12 et 21. Comme expliqué précédemment, l'équation de Yang (2017) est valable seulement si la norme CIPW du quartz, recalculée à 100 %, est inférieure à 40. Malgré la modélisation des précurseurs, il est donc impossible de calculer de pressions pour Cheechoo. La géochimie particulière des roches évoluées du pluton de Cheechoo n'est pas compatible avec les équations de Yang (2017).

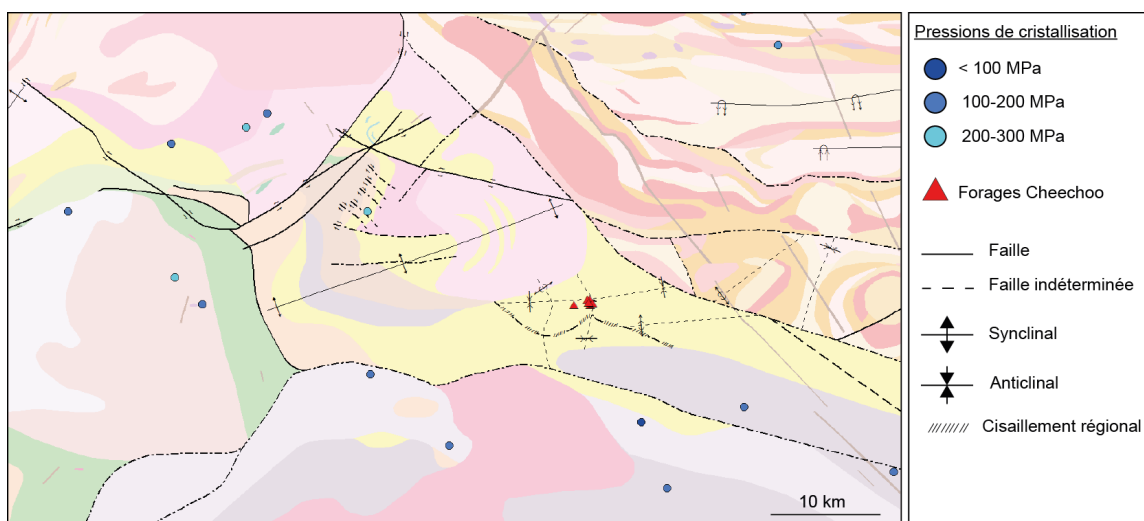


Figure 26. Distribution des pressions de cristallisation des échantillons de tonalites, granodiorites et granites répartis autour de Cheechoo (carte tirée du SIGÉOM).



Les pressions calculées dans le secteur de Cheechoo (feuillets 33C09 et 33B12, Figure 26), varient entre 97 et 225 MPa (soit 0,97 à 2,25 kbar). Les intrusions tonalitiques du Lac Ell et du pluton d'Opinaca montrent des pressions de cristallisation entre 1,01 et 2,23 kbar, et les intrusions granodioritiques entre 1,89 et 2,25 kbar, correspondant à une profondeur de mise en place crustale entre 4 et 8 km. Deux échantillons de tonalite à Éléonore montrent des pressions faibles de 0,9 kbar, suggérant des conditions de mise en place de très faibles profondeurs, inférieure à 4 km.

5.6 Évaluation du potentiel de fertilité porphyrique à Cheechoo

Les gisements porphyriques se mettent en place à faible pression/profondeur crustale, généralement inférieures à 6 km. La relation entre les teneurs en or d'un gisement de type porphyre et sa profondeur de cristallisation est notamment démontrée dans l'étude de Murakami *et al.*, (2010), comme le montre la Figure 27 ci-dessous.

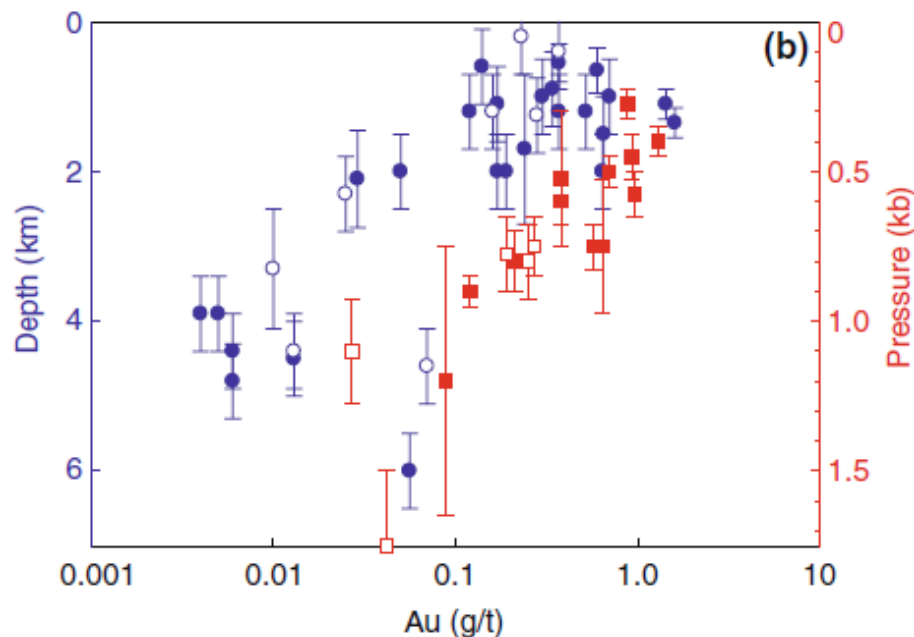


Figure 27. Diagramme extrait de Murakami *et al.*, (2010) illustrant les relations pression/profondeur de cristallisation et teneurs en or pour les gisements de type porphyre. En bleu est représentée l'estimation des profondeurs basée sur des éléments géologiques (relation stratigraphique, niveau d'érosion, séquence d'altération). En rouge est représentée l'estimation des pressions fluides par microthermométrie (inclusions fluides biphasées dans la zone d'altération potassique).

Le potentiel porphyrique d'Eeyou Istchee Baie-James a été démontré dans le projet CONSOREM 2011-07 (Faure, 2012), grâce à une approche méthodologique développée pour identifier des échantillons fertiles pour des minéralisations de type porphyrique Au-Cu (Figure 28). Le secteur du pluton d'Opinaca, de l'intrusion du Lac Ell, de la mine Éléonore et de Cheechoo montre un fort potentiel de fertilité. La méthode développée par Faure (2012) a été automatisée dans LithoModeleur et est basée sur des réseaux de neurones entraînés sur une large banque de compilation de données lithogéochimiques de porphyre à Cu-Au et Au de 60 gisements différents dans le monde (4 465 données).

La modélisation se base sur différents critères discriminants de rapports d'éléments traces et majeurs (Al_2O_3 , TiO_2 , Zr, Nb, Y, La, Ce, V, Hf, Sm, Nd, Yb et Ta). Deux modèles ont été établis : (1) un modèle simplifié moins restrictif et (2) un modèle étendu plus performant. Les deux modèles sont complémentaires et donnent la probabilité qu'un échantillon d'une roche plutonique soit

comparable aux échantillons de porphyres minéralisés Cu-Au. La gamme de probabilité est comprise entre 0 et 1 avec un seuil de 0,4 pour le modèle 1 et de 0,6 pour le modèle 2.

Sur l'ensemble de la base de données lithogéochimiques mise à disposition par Ressources Sirios (rainures et forages), seuls 345 échantillons permettent de réaliser le test de fertilité au regard des éléments traces analysés. La sélection s'est effectuée uniquement sur les échantillons de granodiorite qui ont été par la suite modélisés via la méthode des précurseurs modélisés. Un second test a également été effectué sur 7 échantillons peu altérés (non modélisés) du faciès porphyrique de l'intrusion (I1D-POR).

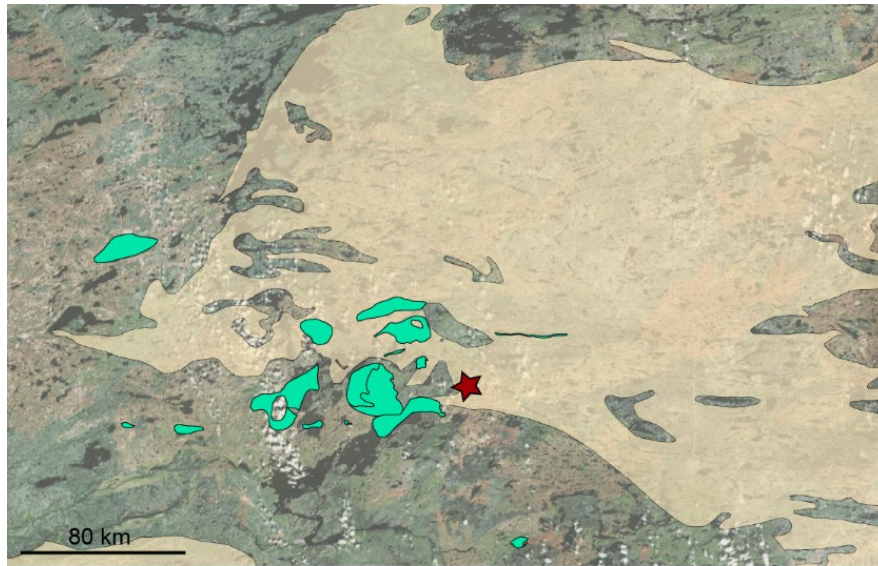


Figure 28. Cartographie des cibles fertiles pour des minéralisations porphyriques Cu-Au (en vert) d'Eeyou Istchee Baie-James (projet 2011-07 ; Faure, 2012). L'étoile rouge symbolise la localisation de Cheechoo. En jaune, le bassin d'Opinaca.

Sur les 345 échantillons testés, 308 échantillons se révèlent être fertiles pour des minéralisations de type porphyre, soit 89 % des données. Le modèle simplifié 1 représente 277 échantillons avec un indice moyen de 0,8 et le modèle 2 représente 31 échantillons avec un indice moyen de 0,6, pouvant atteindre 1 pour deux échantillons. Ces 31 échantillons sont également compatibles avec le modèle 1, qui renforce la modélisation.

Le test effectué sur les échantillons porphyriques de rainures peu altérés donne des résultats positifs avec un indice moyen de fertilité estimés fertiles pour tous les échantillons via le modèle 1 simplifié. Un seul échantillon de forage (à 371 m) atteint la valeur de 0,59, proche de la limite du seuil à 0,6.

Ces résultats montrent que les données géochimiques du pluton de Cheechoo correspondent aux critères géochimiques favorables déterminés à partir des porphyres Au-Cu dans le monde.

5.7 Interprétation

Plus de 1 000 pressions ont pu être calculées avec la méthode de Yang (2017) pour les granitoïdes évolués répartis sur l'ensemble du territoire d'Eeyou Istchee Baie-James. Sur l'ensemble des pressions obtenues, environ 49 % d'entre elles sont inférieures à 100 MPa soit 1 kbar.

Une étude de Samake *et al.*, 2018 sur un porphyre aurifère de nature granodioritique dans le craton Chinois met en évidence que les intrusions ayant une pression de cristallisation plus grande que 4 kbar sont généralement caractérisées par un potentiel de minéralisations plus faible que celles



localisées à des niveaux crustaux moins profonds (environ 1,4 kbar). Ces observations sont en accord avec les travaux de Murakami *et al.*, (2010). Selon Pirajno (2009), les minéralisations de type skarn se mettent également en place à des profondeurs relativement faibles, à des pressions comprises entre 0,3 et 3 kbar, sauf exception pour les skarns profonds à uranium. Les pressions obtenues dans le secteur de Cheechoo correspondent à cette fourchette de pressions (inférieure à 4 kbar) propices aux minéralisations.

Cependant, il est important de tenir compte du biais d'échantillonnage de la base de données du SIGÉOM, dans laquelle la plupart des échantillons sont localisés autour de zones minéralisées. Un indice minéralisé ne correspond pas nécessairement à un gisement économique. Il est donc nécessaire de recouper ces données de pressions de cristallisation avec d'autres facteurs favorables comme les structures crustales, les environnements de dépôts, les conditions redox, les signature magnétiques, etc. Parmi l'ensemble des pressions calculées dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James pour les tonalites, granodiorites et granites, les pressions les plus faibles inférieures à 1 kbar pourraient être judicieuses à cibler et à coupler avec ces facteurs favorables.

Des pressions de cristallisation ont été calculées, via la méthode Yang (2017), pour deux échantillons de tonalite de la mine Éléonore (Fournier, 2017) et montrent des pressions de 0,85 et 0,91 kbar. Ces échantillons ne se révèlent pas fertiles en utilisant la méthode de Faure (2012). Cependant, les échantillons de diorite de la mine Éléonore (17 échantillons), 15 d'entre eux se montrent fertiles avec un indice moyen de 0,9 via la méthode étendue plus robuste, ce qui est très élevé. De plus, dans le secteur, les tests de potentiel porphyre Au-Cu à Cheechoo donnent une réponse favorable pour environ 90 % des échantillons modélisés (rainures et forages) ainsi que pour les échantillons non modélisés peu altérés du faciès porphyrique (I1D-POR) du pluton de Cheechoo.

Au cours des temps géologiques, des études montrent une diminution du nombre de porphyre préservés de 10 Ma jusqu'à 140 Ma (Kesler et Wilkinson, 2006; 2008). Cependant plusieurs gisements sont reconnus comme des porphyres archéens au Canada, mais aussi sur le craton australien (Bookstrom *et al.*, 2010; Sinclair, 2007).

Dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, le porphyre Cu-Au de Troilus dans la Sous-province d'Opatika est bien documenté (Fraser, 1993; Magnan, 1993; Larouche, 2005; Goodman *et al.*, 2005); le granite de Tilly et ses minéralisations en molybdène, ainsi que l'intrusion de Lac Ell riche en Cu sont aussi rapprochés du type porphyrique (Bécu *et al.*, 2007; Chapon, 2011). La tonalite minéralisée La-Grande-Sud est également interprétée comme un porphyre aurifère (Mercier-Langevin *et al.*, 2012). L'ensemble de ces gisements et indices représente des âges de minéralisations et d'encaissants très variables. Les intrusions peuvent être syn-volcaniques (La-Grande-Sud, 2734 Ma; Troilus, 2791,6 et 2782 Ma) ou syn-tectonique (Lac Ell, 2705 Ma). Deux périodes de minéralisation aurifères sont proposées : (1) une minéralisation aurifère précoce pré-déformation D1 et (2) une minéralisation aurifère syn-tectonique de remobilisation suggérée à Troilus et La-Grande-Sud, au cours de la seconde phase de déformation principale D2 reconnue dans la région d'Eeyou Istchee (Goodman *et al.*, 2005, Mercier-Langevin *et al.*, 2012). Pour le porphyre polyphasé de Tilly, l'encaissant granodioritique est daté à $2745,8 \pm 0,8$ Ma (Chapon, 2011), tandis que l'âge estimé de la minéralisation principale serait entre 2740 et 2710 Ma. Un épisode tardif de minéralisation de molybdénite a également été identifié autour de 2636 Ma. La plupart de la mise en place des gisements est le résultat de la superposition de multiples épisodes minéralisateurs, ce qui participe à la complexité des modèles métallogéniques à l'Archéen et des relations entre événements minéralisateurs et épisodes magmatiques et/ou hydrothermaux.

6-Guides d'exploration pour les granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James

6.1 Existe-t-il d'autres « Cheechoo » ?

À l'aide des bilans de masses et des minéraux normatifs caractéristiques de Cheechoo, des échantillons cibles de granitoïdes du SIGÉOM ont pu être sélectionnés et considérés comme ayant une signature géochimique magmatique et hydrothermale comparable à Cheechoo.

6.1.1 Secteurs d'intérêts pour une nouvelle exploration des plutons d'Eeyou Istchee Baie-James

La méthode de ciblage, décrite sur la Figure 29, consiste simplement à considérer l'ensemble des échantillons du SIGÉOM tombant dans le domaine rouge de Cheechoo comme ayant une signature comparable à l'intrusion. Ces derniers seront ainsi considérés comme des cibles potentielles. Les granitoïdes anomaux en sodium sont en ce sens décelés à travers le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James.

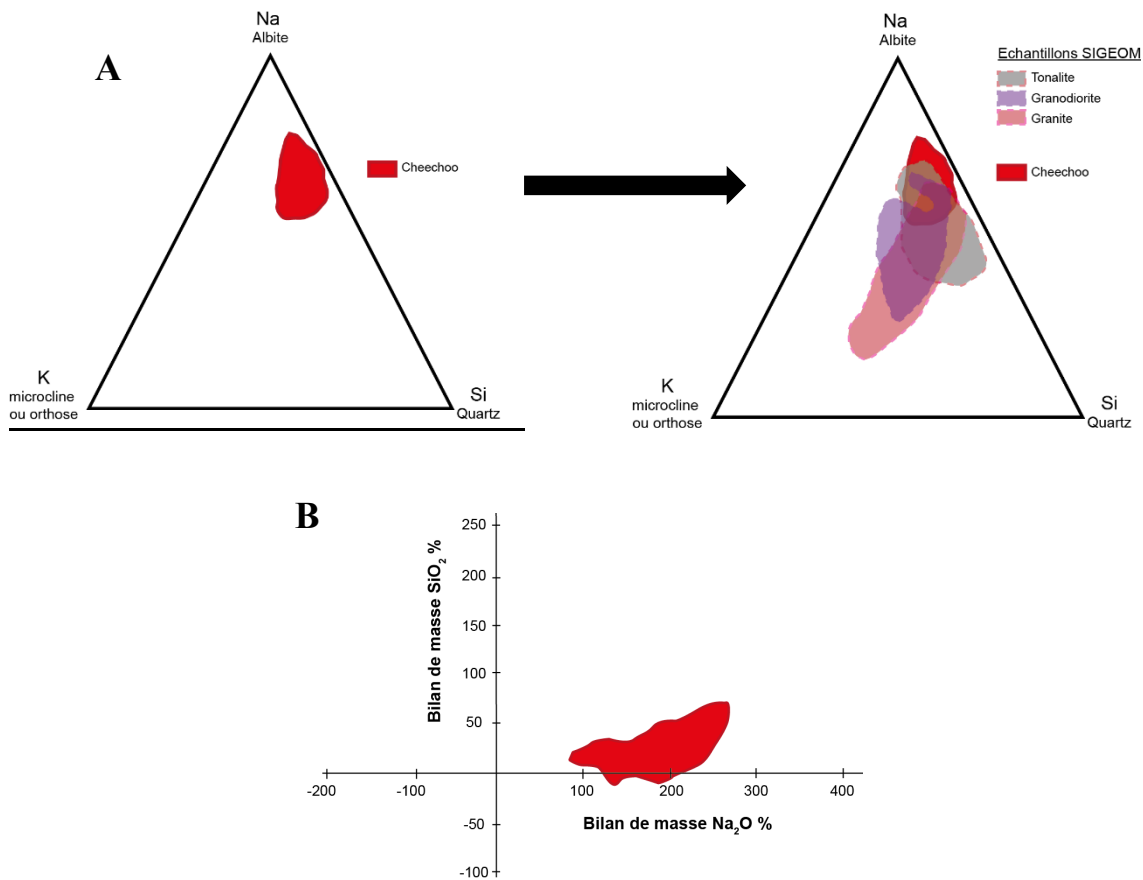


Figure 29. Méthodes de ciblage. A : Comparaison des signatures en minéraux normatifs à Cheechoo avec les autres granitoïdes du SIGÉOM; B : Signature de Cheechoo par les variations de bilans de masses en % relatifs en silice et sodium. Le principe de sélection des échantillons cibles des granitoïdes est le même que pour A.

À Cheechoo, les minéraux normatifs ont été déterminés par la norme bas grade AMP575 dans LithoModeleur, plus adaptée au regard des assemblages minéralogiques connus et du grade métamorphique dans le secteur. D'après l'observation des lames minces et des assemblages, le faciès amphibolite semble également cohérent avec le contexte métamorphique local. Ainsi le



calcul de minéraux normatifs permet de considérer les minéraux hydratés pour le pôle potassique avec l'identification de biotite ferreuse et magnésienne. La norme bas grade AMP575 permet également de calculer la proportion de microcline, qui représente le minéral potassique principal à Cheechoo, en accord avec les observations pétrographiques. La signature du pluton de Cheechoo a été comparée aux normes CIPW classiques (Quartz-Albite-Orthose) des autres granitoïdes d'Eeyou Istchee Baie-James. Il faut noter qu'il existe une très bonne corrélation entre le calcul des minéraux normatifs bas grade AMP575 et le calcul par la norme CIPW pour le pluton de Cheechoo dans LithoModeleur : le coefficient de corrélation est de 0,98 pour le quartz et de 0,86 pour les feldspaths potassiques (microcline, orthose). Il est plus rigoureux d'utiliser la norme bas grade AMP575 pour la signature du pôle potassique à Cheechoo. Pour le ciblage par minéraux normatifs, une dizaine d'échantillons cibles par type de granitoïde (tonalite, granodiorite et granite) ont été sélectionnés. Pour le ciblage par bilans de masses, l'ensemble des échantillons modélisés de granitoïdes se superposant au domaine rouge de Cheechoo ont été considérés comme cible (Figure 29B). Au total, 201 échantillons ont été ciblés par la méthode des bilans de masses. Les bilans de masses relatifs en sodium pour les cibles de tonalites, granodiorites et granite varient respectivement entre 100-229 %, 90-270 % et 96-303 %.

La distribution des échantillons cibles est illustrée sur la Figure 30. Il en ressort des cibles isolées représentées par un ou deux échantillons puis des secteurs représentés par plusieurs échantillons cibles, ce qui peut renforcer la pertinence du ciblage. Certains échantillons sont également ressortis par les deux méthodes de cibrages (Figure 29).

Plusieurs secteurs d'intérêts ressortent sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James (Figure 30) : 1) le complexe de Laguiche, proche de la nouvelle zone favorable découverte en 2017 par le MERN au Lac Ewart, présentant une haute favorabilité pour l'or (feuillet 33G04); 2) le synclinal du Lac Salo (feuillet 33H08); 3) la faille de la Grande Rivière (feuillet 33H14); et 4) la zone Eau Claire (feuilles 33B04 et 33B03).

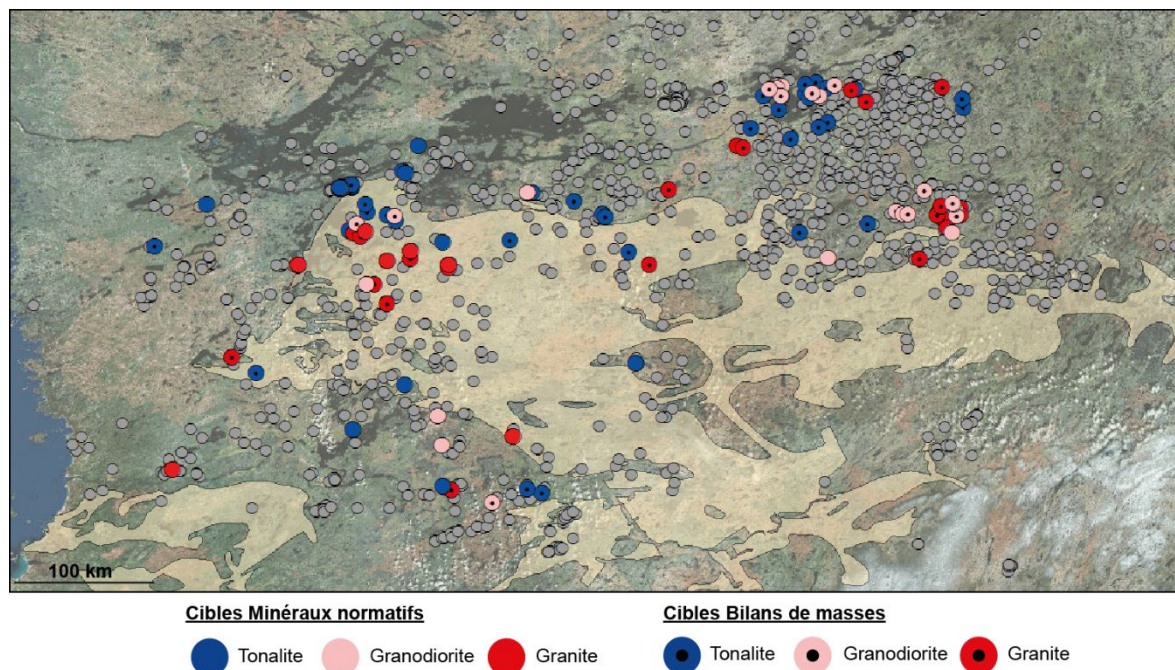


Figure 30. Distribution des échantillons cibles de granitoïdes (SIGÉOM), déterminés à partir du calcul des minéraux normatifs et des bilans de masses en SiO_2 et Na_2O . Les échantillons représentés par les cercles gris sont les échantillons (tonalite, granodiorite, granite) du SIGÉOM non ciblés.

Nouvelle zone de haute favorabilité en or – Lac Ewart

Cette zone a été identifiée de façon ponctuelle au cours des travaux du MERN sur l'évaluation du potentiel minéral des zones aurifères orogéniques (Figure 31, Lac Ewart-2). Des teneurs anormales en or de 300 ppb ont été obtenues. La zone d'intérêt est proche d'un cisaillement régional et d'intrusions ultramafiques. Un échantillon cible est ressorti dans cette zone, sachant qu'il existe seulement 3 échantillons de roche correspondant à l'intrusion concernée par la cible. Il s'agit d'un échantillon du granite du Vieux Comptoir appartenant au faciès à biotite et magnétite.

Une seconde zone favorable à proximité correspond à une auréole de 2 à 3 km de diamètre, également en périphérie d'une intrusion granitique du Vieux Comptoir (Figure 31, Lac Ewart-1). Elle se caractérise par la présence d'intrusions pegmatitiques rubanées et enrichies en Be (indice Blacksmith) coupant les paragneiss du Complexe de Laguiche. Le modèle classique permet de supposer une zonation des pegmatites marquée par un enrichissement progressif du Be puis de Be-Nb-Ta, Li-Be-Ta-Nb, et enfin, de Li-Cs-Be-Ta-Nb en s'éloignant du pluton (SIGÉOM, 2017). Le secteur du Lac Ewart présente donc ici un double intérêt pour la prospection des intrusions du feuillet 33G04.

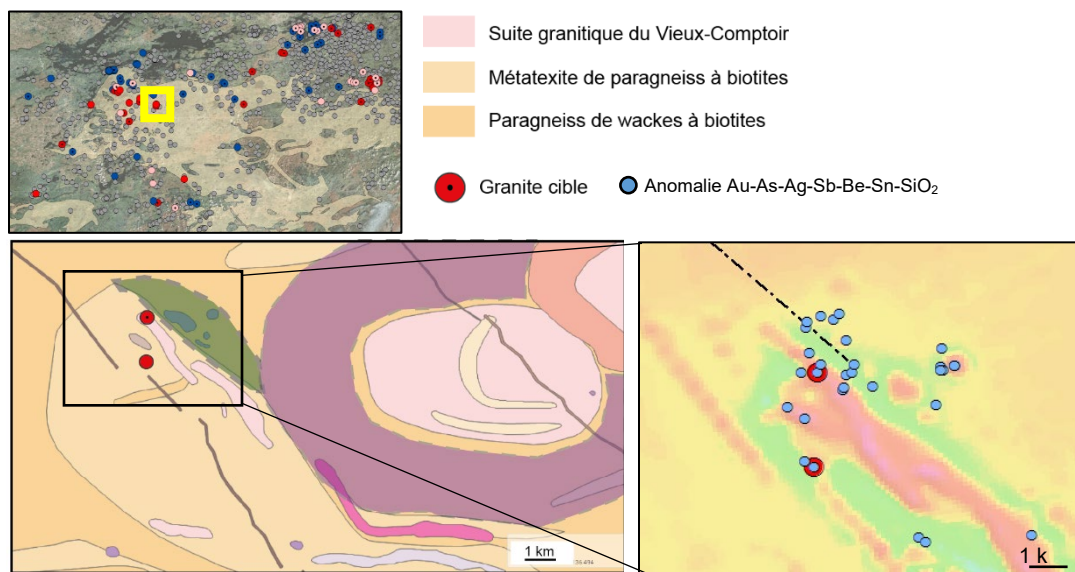


Figure 31. Localisation de l'échantillon cible de granite près des zones favorables Ewart 1 (violet) et Ewart 2 (vert) récemment découvertes par le MERN en 2017. Un des échantillons de granite (Éch. 1903013995) a été ciblé par les deux méthodes de ciblage. L'intrusion du Vieux Comptoir montre une signature magnétique avec la présence d'un cluster d'anomalie Au-As-Ag-Sb-Be-Sn-SiO₂ (projet 2015-02, L. Bigot).

De plus, le projet CONSOREM 2015-02 (Bigot, 2016) a permis de mettre en évidence la présence d'une zone d'anomalies Au-As-Ag-Sb-Be-Sn-SiO₂ (Figure 31) au niveau des échantillons cibles de granite, ce qui renforce le potentiel minéral de la zone.

Le secteur La-Grande-Sud et le complexe de Laguiche

Le ciblage a permis de détecter la tonalite aurifère de La-Grande-Sud ainsi que 14 autres cibles potentielles de granitoïdes au nord du complexe de Laguiche (Figure 32) : six échantillons de granite appartenant probablement à la suite du Vieux Comptoir, six échantillons de tonalite à biotite et/ou magnétite, et deux échantillons de granodiorites foliées à biotite. Le complexe



métamorphique de Laguiche est cependant encore très peu échantillonné et il n'existe aucun claim actif sur le secteur ciblé en date de la publication de ce rapport (Figure 32).

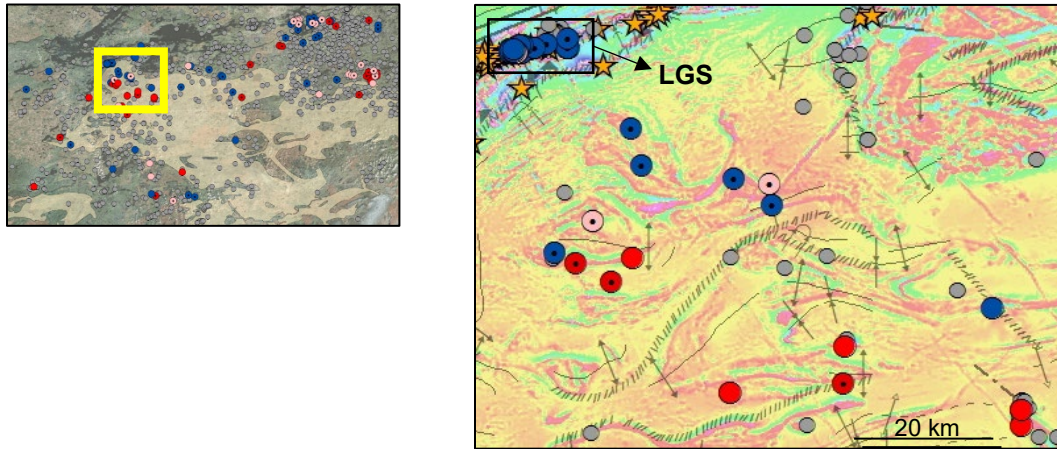


Figure 32. Localisation des échantillons cibles dans le secteur nord du complexe de Laguiche avec la localisation de la tonalite de La-Grande-Sud (LGS sur la carte) qui est également ressortie en tant que cible.

On note la présence d'anomalies Au-As-Ag-Sb-Be-Sn-SiO₂ qui se superposent à la majorité des échantillons cibles de tonalite de La-Grande-Sud déterminés par les deux méthodes de ciblage de ce projet (Figure 33). Cela indique une fois de plus la présence d'une caractéristique commune avec l'intrusion de Cheechoo, soit une zone anormale riche en sodium et silice. La présence d'albite est effectivement décrite dans certains assemblages minéralogiques répartis de manière hétérogène au sein de la tonalite de La-Grande-Sud, selon les travaux de Mercier-Langevin *et al.*, (2012; Figure 33A).

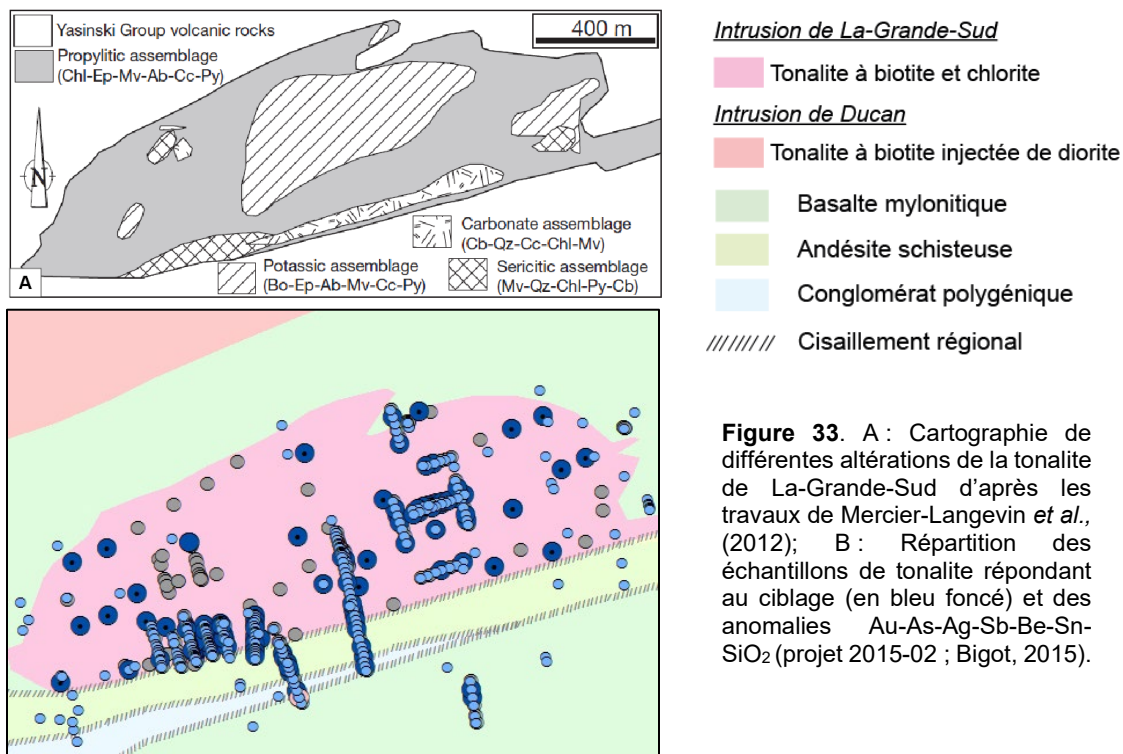


Figure 33. A : Cartographie de différentes altérations de la tonalite de La-Grande-Sud d'après les travaux de Mercier-Langevin *et al.*, (2012); B : Répartition des échantillons de tonalite répondant au ciblage (en bleu foncé) et des anomalies Au-As-Ag-Sb-Be-Sn-SiO₂ (projet 2015-02 ; Bigot, 2015).

La faille de la Grande Rivière

Les échantillons cibles se localisent dans le batholite de Polaris, représenté par une granodiorite massive à biotite foliée (Figure 34). Cette intrusion peut contenir des amas centimétriques à métriques de tonalite et de diorite avec la présence d'injections de granite mélanocrate, de dykes de pegmatite et de rares enclaves d'amphibolite. À l'échelle plus régionale, les cibles se distribuent entre le pluton de La Grande (9 échantillons) et le pluton de Nochet (4 échantillons).

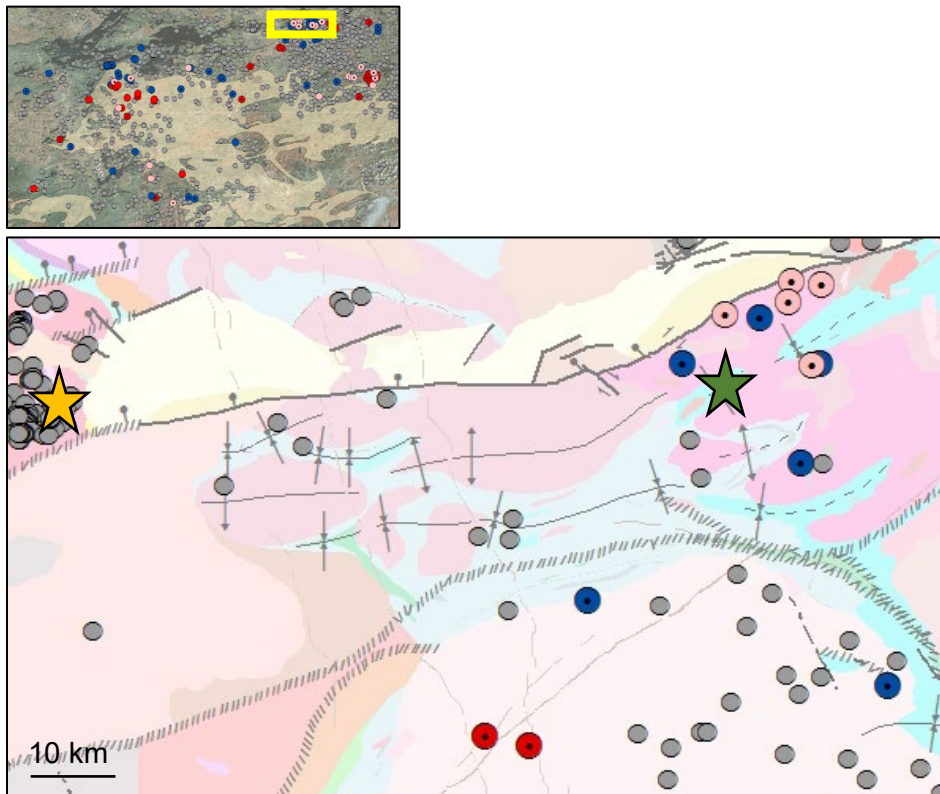


Figure 34. Localisation des échantillons cibles le long de la faille de la Grande Rivière. L'étoile jaune symbolise l'indice aurifère de la brèche Yogi et du granite de Tilly. L'étoile verte est un échantillon géochronologique à 2681 Ma dans le pluton de La Grande.

Le corridor structural de Wemindji-Caniapiscau dans lequel est identifiée la faille de La Grande Rivière est un métallotecte reconnu sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James. Il est évoqué comme ayant joué un rôle important dans la mise en place des intrusions du secteur de Tilly notamment (Chapon, 2011). Il est également une cible pour la prospection pour les diamants (Labbé, 2001; Houle, 2003). La faille régionale de la Grande Rivière est interprétée comme une faille listrique profonde néo-archéenne (Chapon, 2011). L'indice aurifère de la brèche Yogi et du granite de Tilly sont situés dans le secteur, au sud-ouest de la faille. Ces indices sont constitués respectivement, d'une brèche minéralisée à fragments anguleux de tonalite et d'une intrusion porphyrique à molybdène-cuivre affectée par une bréchification hydrothermale.

Un échantillon de granodiorite du pluton de La Grande est daté à 2681 Ma (SIGÉOM, Figure 34) et des échantillons cibles de granodiorite ressortent au nord-est de la faille, non loin de l'échantillon géochronologique.



Le secteur Eau Claire

La propriété Eau claire (Clearwater) se localise dans la ceinture de roches vertes de la Basse Eastmain, adjacente à un socle tonalitique daté à $2811,4 \pm 4$ Ma (Mortensen et Ciesielki, 1987). La géologie de la propriété est représentée par des coulées mafiques et des roches volcanoclastiques felsiques dans lesquelles s'intercalent des formations de fer, des roches métasédimentaires ainsi que des intrusions et des dykes de compositions variées. La minéralisation aurifère se retrouve au sein de systèmes de veines de quartz contenus dans une séquence de coulées mafiques massives, localement coussinées, dans lesquelles s'intercalent des bandes étroites de roches métasédimentaires volcanoclastiques. Les coulées et les roches métasédimentaires ont été coupées par plusieurs phases de dykes porphyriques felsiques à intermédiaires. Les réseaux de veines de quartz-tourmaline parallèles et aurifères sont associés à des auréoles d'altération à actinolite \pm biotite \pm carbonate (Eastmain Resources).

Les échantillons cibles sont localisés dans le batholite de Casey et le batholite de Village (Figure 35). La tonalite du batholite du Village est datée entre 2720 et 2700 Ma (Moukhsil, 2000) et la monzonite pegmatitique entre 2696 et 2676 Ma (David *et al.*, 2010).

Deux échantillons cibles de tonalite sont localisés dans une zone de fort contraste de pendage d'après la carte d'interpolation des données structurales des travaux de Lapointe (2008). Elle propose également plusieurs autres secteurs cibles (Figure 35) associés aux zones de fort contraste de pendage proche des cibles tonalitiques. Les zones de fort contraste de pendage sont ici considérées comme propice au piégeage des minéralisations. D'après ces travaux, la zone de Cheechoo est également considérée comme une zone de fort contraste et ce secteur avait été ciblé dès 2007, suite à la compilation de données structurales du projet CONSOREM 2007-07 (Lapointe, 2008).

Une autre cible de tonalite est localisée au sein d'un regroupement d'anomalie Au-As-Ag-Sb-Be-Sn-SiO₂ mis en évidence par Bigot (2016; projet CONSOREM 2015-02), en plein cœur de la zone du projet Eau Claire. Les pressions de cristallisation calculées pour la tonalite cible à Eau Claire est identique à celle calculée pour la tonalite minéralisée d'Héberto (1,7 kbar), localisée une trentaine de km à l'ouest (Figure 35). Le projet 2011-07 (Faure, 2012) a mis en évidence l'existence d'un pluton fertile dans le même secteur, le pluton de Labyrinthe (Figure 35). Une pression très faible a été obtenue sur un échantillon de granite du pluton cible fertile à 0,36 kbar soit environ 1 km de profondeur équivalente, ce qui est très faible.

La cible de granodiorite est localisée en bordure d'une propriété détenue par Exploration Midland, actuellement en cours d'exploration dans le secteur. Les granitoïdes de cette zone sont très peu échantillonnés en comparaison avec les roches volcaniques mafiques et felsiques. Le focus a été fait principalement au niveau de la ceinture de roches vertes de la basse Eastmain.

La question qui peut être soulevée ici est de se demander s'il peut exister un potentiel sous-estimé dans les plutons du secteur, auquel pourrait se superposer un système de veines de Qz-Cb-Tr associé à un style orogénique principalement contrôlé par les structures majeures, déjà identifié dans le projet Eau Claire par Eastmain Resources.



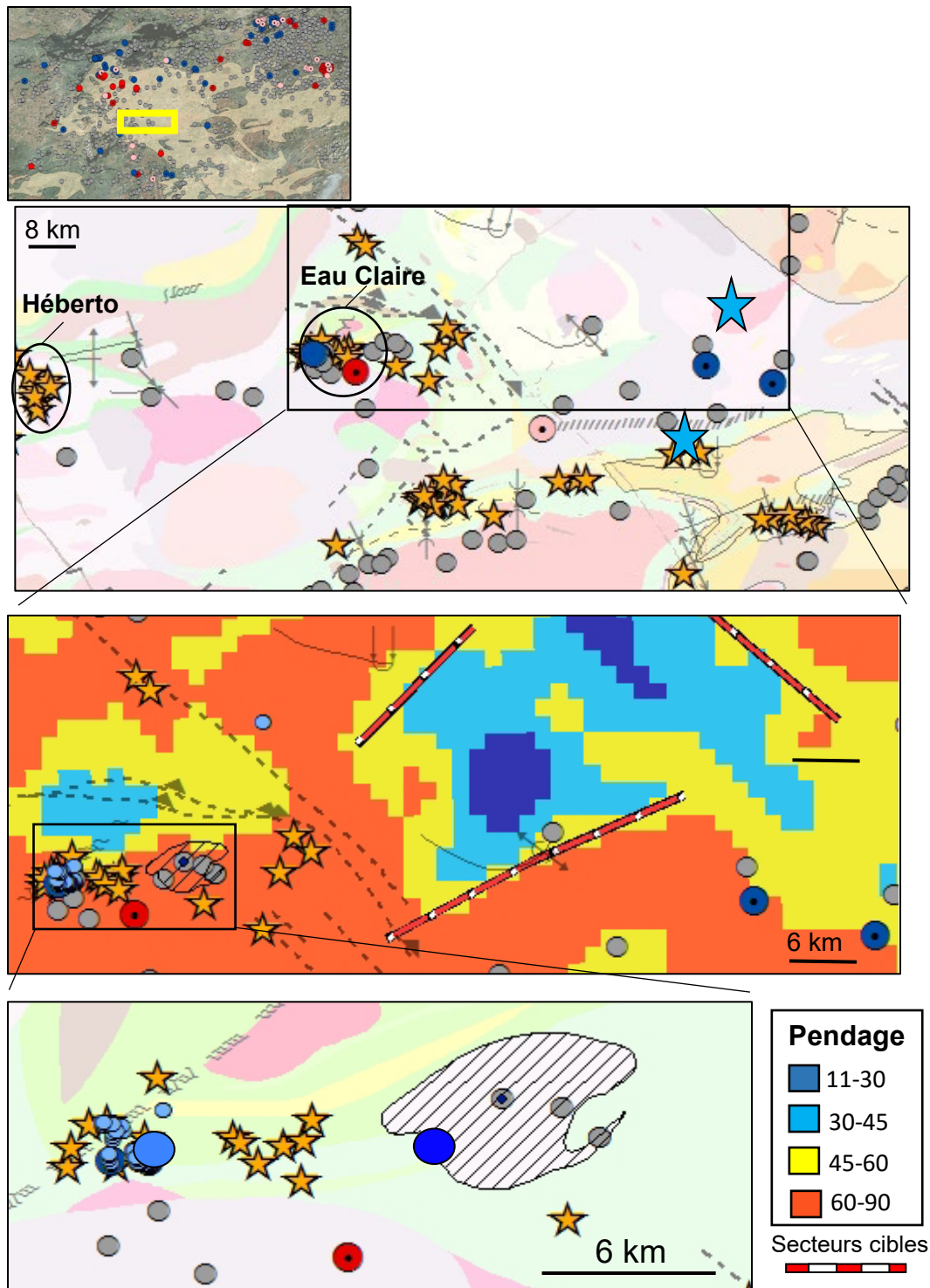


Figure 35. Carte d'interpolation de données structurales issues des travaux de Lapointe (2008; projet CONSOREM 2007-07), appliquée à la zone Eau Claire et agrandissement sur la cible fertile (hachurée) du pluton de Labyrinthe déterminée par Faure (2012). Les cercles bleus sont les données de pressions obtenues pour un échantillon de granite du pluton cible (0,36 kbar) et d'un échantillon de tonalite du secteur Eau Claire (1,7 kbar). Les étoiles bleues représentent les deux datations disponibles dans le SIGÉOM (2720-2700 Ma et 2697-2676 Ma).

L'intrusion du Lac Salo

Les échantillons cibles sont localisés au sein d'une intrusion granodioritique et granitique foliée à biotite et magnétite (Figure 36). À proximité de la grande intrusion, le pluton de Miramar paraît également comme cible potentielle. Les échantillons cibles s'alignent le long d'un synclinal local, compris entre deux ceintures de roches vertes de laves mafiques à intermédiaires (formation de Trieste et formation de Dalmas) où de nombreux indices aurifères sont répertoriés. Il existe une lacune d'échantillonnage au niveau de l'intrusif. On peut souligner que malgré la faiblesse du nombre d'échantillons, tous ressortent au ciblage. L'intrusion du Lac Salo et le pluton de Miramar présentent donc, d'après le calcul de bilans de masses, une composante hydrothermale anormale en sodium et en silice.

Au moment de la publication de ce rapport, aucun claim actif n'existe au niveau de l'intrusion elle-même, mais les compagnies minières Osisko Baie James et Exploration Midland sont présentes de part et d'autre des deux intrusifs, dans les ceintures de roches vertes. Une partie du pluton de La Savonnière est occupée par Azimut Exploration.

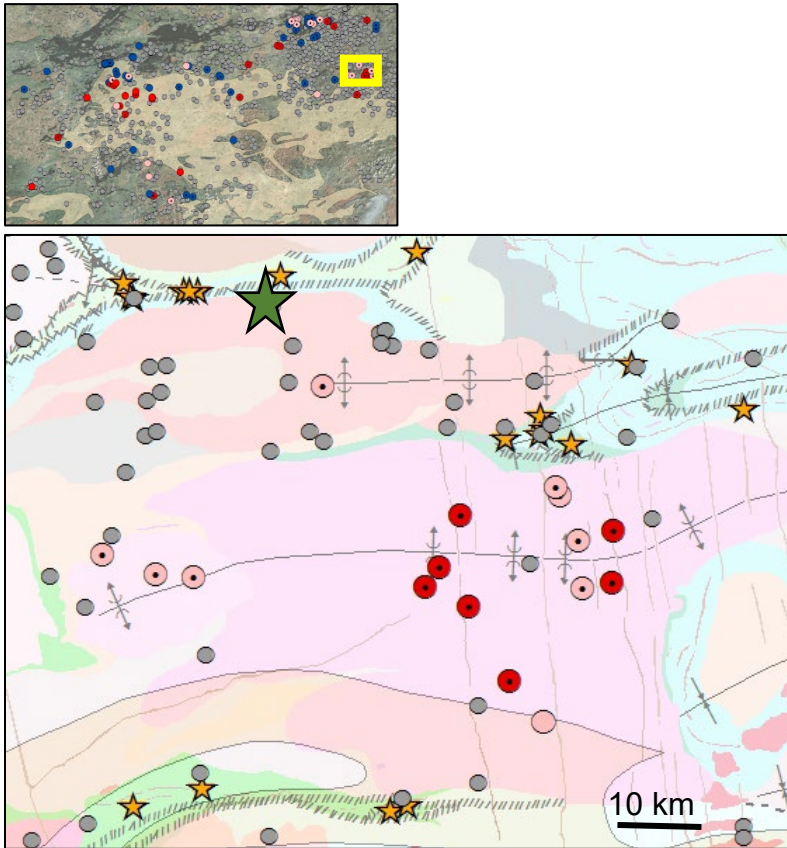


Figure 36. Localisation des échantillons cibles le long du synclinal du Lac Salo. Les étoiles jaunes représentent les indices aurifères connus associés aux ceintures de roches vertes (SIGÉOM). L'étoile verte représente la datation à 2685 Ma du pluton de la Savonnière.

7- Conclusion

Les résultats de ce projet permettent d'apporter des éléments de réponse sur la nature de l'intrusion aurifère de Cheechoo et de proposer des cibles d'exploration sur la base de sa signature spécifique dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James.

Le pluton de Cheechoo montre des signatures très différentes de l'évolution magmatique régionale classique avec une composition particulièrement peralumineuse. Il s'agit d'une granodiorite tardive très probablement polyphasée comme le suggère les précurseurs modélisés avec la possibilité de plusieurs précurseurs. La datation à 2612 Ma (Fontaine *et al.*, 2015) pourrait alors appartenir à la phase tardive de mise en place de l'intrusion. Avant altération, la granodiorite devait être déjà anomalique et initialement riche en sodium. Le métasomatisme sodique s'est alors superposé à cette composition initiale, ce qui justifie les très forts gains en sodium observés et que la modélisation ne peut prendre en compte. L'incompatibilité des équations de Yang (2017) avec la chimie de Cheechoo pour le calcul des pressions de cristallisation, malgré le fait d'être passé par la méthode des précurseurs modélisés, appuie le fait que l'intrusion avait une composition différente des granitoïdes évolués classiques.

Les travaux de Li *et al.*, (2017) sur des leucogranites protérozoïques du craton chinois proposent un rôle important du fractionnement des feldspaths potassiques au cours de l'évolution magmatique pour expliquer la présence de granite riche en sodium génétiquement lié à des leucogranites de composition classique (Figure 37). Le magma résiduel très différencié issu d'un magma riche en potassium serait la source de ce type de granite (Group III, Figure 37). Cette hypothèse est également suggérée dans les travaux de Morfin (2014) dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James pour expliquer les compositions particulières des injections de leucogranite sodique dans le complexe de Laguiche (feuillet 33B12 et 33B13). Un mécanisme selon lequel un liquide résiduel enrichi en sodium et silice serait formé par le fractionnement du feldspath potassique, est ainsi proposé comme étant à l'origine de ces injections de leucogranites.

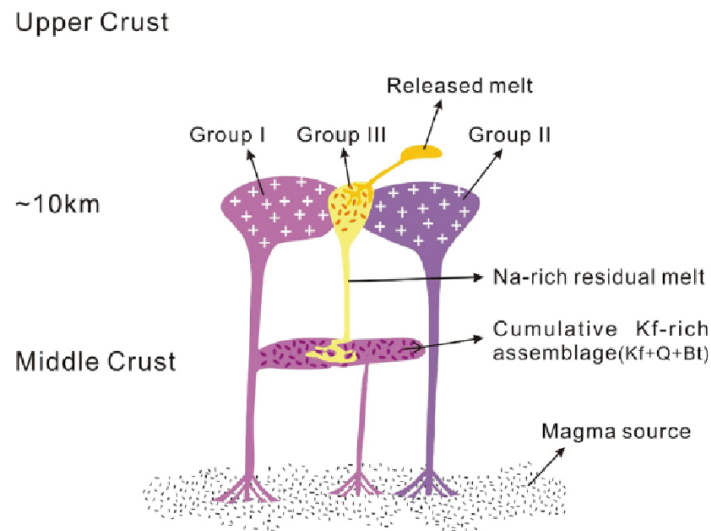


Figure 37. Illustration issue des travaux de Li *et al.*, (2017) suggérant un modèle génétique pour la formation des granites protérozoïques riches en albite sur le craton chinois.

Cette hypothèse permet d'imaginer la possibilité d'une relation génétique étroite entre les magmas pegmatitiques plus riches en K à Cheechoo et l'intrusion granodioritique issue d'un magma résiduel plus sodique. Il faut noter que l'albitisation tardive associée à la formation du gisement aurifère

peut plutôt être considérée comme le fruit d'une interaction de longue durée entre un fluide hydrothermal et la roche.

La signature des pegmatites de Cheechoo est similaire à celles des roches granitiques du Vieux Comptoir, dont la phase tardive est datée à 2618 Ma. La Suite du Vieux Comptoir est aussi polyphasée avec l'authentification de plusieurs faciès reconnus par le MERN, dont la mise en place est susceptible de s'étaler sur plusieurs dizaines de millions d'années (2683 Ma; 2655-2633 Ma; 2618 Ma).

Le secteur de Cheechoo se révèle aussi comme favorable à un potentiel porphyrique au sens large, avec l'identification de faibles pressions de cristallisation et des profondeurs de mise en place pour des intrusions à proximité du gîte entre 4 et 8 km. Les fortes similitudes avec la tonalite de La-Grande-Sud montrent qu'il existe d'autres intrusions comparables sur certains aspects à Cheechoo mais dont l'âge de mise en place est totalement différent. En Abitibi, de nombreuses albitites ont été recensées avec un âge de mise en place estimé entre 2676 et 2672 Ma (Ayer *et al.*, 2005). Les époques de mise en place et les compositions géochimiques sont cependant bien différentes de Cheechoo.

La région d'Eeyou Istchee Baie-James se distingue de l'Abitibi par un plus grand nombre d'intrusions à composition peralumineuse et par la présence de très vieux socle. On a ainsi daté un gneiss granitique au Lac Yasinski à 3,4 Ga et une tonalite proche de l'indice aurifère Ilto à 2,8 Ga. Il existe également beaucoup plus d'âges Néoarchéens tardifs répertoriés sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James par rapport à ce qui est connu en Abitibi avec les intrusions les plus jeunes qui sont représentées par les batholites de La Motte (2647 \pm 2 Ma à 2639 \pm 1 Ma) et de La Corne (2643 \pm 2 Ma à 2641 \pm 2 Ma).

L'intégration de l'ensemble des données de ce projet combinée à d'autres anciens projets, permet de mettre en avant une cinquantaine de cibles de granitoïdes référencées en détails et remet l'emphasis sur le potentiel des intrusions associées aux altérations sodiques et aux minéralisations aurifères.

8- Remerciements

Je tenais sincèrement à remercier Jordi Turcotte et Dominique Doucet pour leur implication dans ce projet. Merci également à Jean Goutier, Sylvain Trépanier, Arnaud Fontaine, Michel Jébrak et Stéphane De Souza pour l'ensemble des discussions et des idées partagées au cours de cette année. Enfin un grand merci à Réal Daigneault pour sa confiance et aux merveilleux collègues pour leur aide et leur bonne humeur.



9- Références

- Aucoin, M. (2008). Métallogénie de la zone Marco, gîte aurifère Corvet Est, Baie-James, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, Université Laval, p97.
- Ayer, J.A., Thurston, P.C., Bateman, R., Dubé, B., Gibson, H.L., Hamilton, M.A., Hathway, B., Hocker, S.M., Houlié, M.G., Hudak, G., Ispolatov, V.O., Lafrance, B., Leshner, C.M., MacDonald, P.J., Pélouquin, A.S., Piercey, S.J., Reed, L.E., Thompson, P.H. (2005). Overview of results from the greenstone architecture project : Discover Abitibi Initiative. Ontario geological Survey, Open File Report 6154, p146.
- Bandyayera, D., Rhéaume, P., Maurice, C., Bédard, E., Morfin, S., Sawyer, E.W. (2010). Synthèse géologique du secteur du réservoir Opinaca, Baie-James. RG 2010-02, 46p.
- Bécu, V., Ravenelle, J.F., Malo, M., Dubé, B., Gauthier, M., Simoneau, J. (2007). Résultats préliminaires de l'étude de la minéralisation Cu-Au-Ag de l'indice du Lac Ell et de ses implications sur la genèse du gisement d'or Roberto, propriété Éléonore, Baie-James. Rapport annuel DIVEX SC21, p33.
- Bigot L. (2016). Contexte des minéralisations aurifères dans les formations de fer. Rapport, projet CONSOREM 2015-02, 69 p.
- Blu, F (2017). Minéralisations aurifères liées à des intrusions archéennes dans la zone centrale de la ceinture de roche verte moyenne et basse Eastmain (Baie-James) : cas du gîte Héberto. Mémoire de master, Nancy, 49p.
- Bookstrom, A.A., Glen, R.A., Hammarstrom, J.M., Robinson, G.R., Zientek, M.L., Drenth, B.J., Jaireth, S., Cossette, P.M., Wallis, J.C. (2010). Porphyry Copper assessment of Eastern Australia. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5090-L, p160.
- Bogatu, A., Huot, F. (2016). Minéralisation aurifère du gîte Orfée, Eeyou Istchee Baie-James, Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MB 2016-10, p47.
- Cadéron, S. (2003). Interprétation tectonométamorphique du Nord de la province du supérieur, Québec, Canada. Thèse, p343.
- Chappell, B.W., White, A.J.R. (1992). I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 83, 1-26.
- Chappell, B.W., Bryant, C.J., Wyborn, D. (2012). Peraluminous I-type granites. Lithos, 153, 142-153.
- Chapon, B. (2011). Le porphyre archéen à Mo-Cu±Au de Tilly, Baie-James, Québec. Rapport de maîtrise, UQÀM, p193.
- Côté-Roberge, M., Guilmette, C., Goutier, J. (2016). Etude du contexte tectono-métamorphique du complexe de Laguiche, sous-province d'Opinaca, Eeyou Istchee, Baie-James, Québec. MB2016-13, p27.
- Côté-Roberge, M., Guilmette, C., Goutier, J., Harris, L., Smit, M., Davis, D., Clevén, N. (2018). The tectonometamorphic context of the north-west Opinaca, Superior Province, Eeyou Istchee, Baie-James. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-10613.
- David, J., Parent, M. (1997). Géochronologie U-Pb du projet Moyen-nord. GM59903, MRNQ, p90.
- David, J., Davis, W.D., Bandyayera, D., Mouskhsil, A., Simard, M., Dion, C. (2010). Datations U-Pb effectuées dans les sous-provinces de l'Ashuanipi, de Minto et de La Grande en 2007-2008. RP 2010-03. MRNF
- Davis, D.W., Mouskshil, A., Lafrance, I., Hammouche, H., Goutier, J., Pilote, P., Takam, T.F. (2015). Datations U-Pb dans les provinces du Supérieur, de Churchill et de Grenville effectuées au JSGL en 2012-2013. RP 2014-07, p56.
- Davies, J.F., Whitehead, R.E. (2011). Alkali/alumina ratio in altered granitoid rocks hosting porphyry and related deposits. *Explo. Min. Geol.*, 19, 13-22.
- Dion, C., Pilote, P., David, J., Cater, D. (1998). Géologie et âge de la minéralisation Au-Cu à la mine Troilus, ceinture de Frotet Evans, Québec. *Geol. Assoc. Canada Annual Meeting*, abstract volume, 23, p46.



- Duuring, P., Cassidy, K.F., Hagemann, S.G. (2007). Granitoid-associated orogenic, intrusion-related, and porphyry style metal deposits in the Archean Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geol., Rev.*, 32, 157-186.
- Emmons, W.H. (1937). Gold and igneous rocks. In *Gold Deposits of the world*, McGraw-Hill, New-York, 12-37.
- Faure, S. (2012). Porphyres Cu-Au subcalins : caractéristiques géochimiques et cibles d'exploration dans les terrains de haut grade métamorphique archéens et paléoprotérozoïques au Québec. Rapport, projet CONSOREM 2011-07, 25 p.
- Fayol, N., Jébrak, M., Harris, L.B. (2016). The magnetic signature of Neoarchean alkaline intrusions and their related gold deposits : Significance and exploration implications. *Precambrian Research*, 283, 13-23.
- Feng, R., et Kerrich, R. (1990). Geobarometry, differential block movements, and crustal structure of the southwestern Abitibi greenstone belt, Canada. *Geology*, 18, 870-873.
- Feng, R., et Kerrich, R. (1992). Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi southern volcanic zone and the Pontiac subprovince, Superior Province, Canada : implications for tectonic history and source regions. *Chem. Geol.*, 98, 23-70.
- Fontaine, A., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V.J., Brisson, T., Doucet, D., and Goutier, J. (2015). Geology of the metamorphosed Roberto gold deposit (Éléonore Mine), James Bay region, Quebec: diversity of mineralization styles in a polyphase tectonometamorphic setting. In *Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, (ed.) B. Dubé and P. Mercier Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, p. 209–225.
- Fontaine, A., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Jackson, S., Beausoleil, C., Layne, G.D., Goutier, J. (2017). Geology and insights on the genesis of the Eleonore gold mine, Eeyou Istchee James Bay, Superior Province, Québec, Canada. *Mineral Resource to discover*, 14th SGA Biennial meeting 2017, Vol.1, 31-34.
- Fournier, E. (2017). Projet Éléonore, levé géologique été 2016 (2), Baie-James. GM 70043, 115p.
- Fraser, R.J. (1993). The Lac Troilus gold-copper deposit, Northwestern Quebec : a possible Archean porphyry system. *Economic geology*, 88, 1685-1699.
- Gaboury, D. (2004). Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères : comparaison de la performance d'indicateurs d'altération. Rapport, projet CONSOREM 2000-2a, 77 p.
- Gardner, J.E., Befus, K.S., Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S. (2014). Experimental constraints on rhyolite-MELTS and the Bishop Tuff magma body. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 168, 1051.
- Gauthier, M., Trépanier, S., Gardoll, S. (2007). Metamorphic gradient : a regional-scale area selection criterion for gold in the Northeastern Superior Province, Eastern Canadian Shield. *Soc. Econo. Geol. Newslett.*, 69, 10-15.
- Glazner, A.F., Coleman, D.S., Bartley, J.M. (2008). The tenuous connection between high-silica rhyolites and granodiorite plutons. *Geology*, 36, 1047-1050.
- Gloaguen, E. (2006). Apports d'une étude intégrée sur les relations entre granites et minéralisations filonniennes (Au et Sn-W) en contexte tardi-orogénique (Chaîne Hercynienne, Galice centrale, Espagne). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, p575.
- Goodman, S., Williams-Jones, A.E., Carles, P. (2005). Structural controls on the Archean Toilus gold-copper deposit, Québec, Canada. *Economic Geology*, 100, 577-582.
- Goutier, J., Dion, C., Lafrance, I., David, J., Parent, M., Dion, D.J. (1999). Géologie de la région des lacs Langelier et Threefold (SNRC 33F/03 et 33F/04). Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG 98-18, p52.
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M-C., Davis, D.W., David, J. et Parent, M. (2002). Géologie de la région du lac Guyer (33G/05, 33G/06 et 33G/11) - RG 2001-15, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec.



- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S., Lemons, R.V., Carley, T.L. (2012) Rhyolite-MELTS : a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875-890.
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M. (2013). Low-pressure origin of high-silica rhyolites and granites. *Journal of geology*, 121, 537-545.
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M. (2015). MELTS-excel : A Microsoft Excel-based MELTS interface for research and teaching of magma properties and evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 315-324.
- Hammarstrom, J.M., Zen., E. A. (1986). Aluminium in hornblende : An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist.*, 71, 1297-1313.
- Hart, C.J.R. (2005). Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *The Gangue*, Issue 87, p18.
- Hodgson, C.J. (1993). Mesothermal lode-deposits. In : Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, T.I., Duke, J.M. (eds). *Mineral deposit modeling*. *Geol. Assoc. Can.*, special paper, 40, 635-678.
- Hollister, V.F. (1992). On a proposed plutonic porphyry gold deposit model. *Natural Resources Research*, 1, 293-302.
- Houle, P. (2003). Territoire de la Baie-James; partie médiane de la province du Supérieur (sous-provinces d'Opatika, d'Opinaca, de Nemiscau et de la Grande). MRNF, rapport RG2001-15, p53.
- Ishihara, S (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293-305.
- Johnson, M.C., Rutherford, M.J. (1989). Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17, 837-841.
- Kalfoun, F. (2007). Géochimie du niobium et du tantale: distribution et fractionnement de ces deux éléments dans les différents réservoirs terrestres. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, p273.
- Katz, L.R., Kontak, D.J., Dubé, B., McNicoll, V. (2015). The Archean Côté Gold intrusion related Au(Cu) deposit, Ontario: A large tonnage, low grade deposit centred on a magmatic hydrothermal breccia. In: *Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, (eds) B. Dubé and P. Mercier Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, 139-155.
- Kesler, S.E., Wilkinson, B.H. (2006). The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits. *Economic Geology*, express letter, 101, 919-922.
- Kesler, S.E., Wilkinson, B.H. (2008). Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. *The Geological Society of America*, 36, 255-258.
- Kolb J., Dziggel A., Schlatter D.M (2013). Gold occurrences of the Archean North Atlantic craton, Southwestern Greenland : A comprehensive genetic model. *Ore Geol. Rev.*, 54, 29-58.
- Labbé, J.Y. (2001). Linéaments crustaux et potentiel de découverte de kimberlite dans l'ouest du Nouveau-Québec. PRO 2011-01, MERN, p9.
- Lafrance, B. (2010). Signature lithogéochimique des altérations à épidote- quartz semi-concordantes associées aux SMV. Rapport, projet CONSOREM 2009-03, 18 pages.
- Lapointe, I. (2008). Environnements sédimentaires aurifères en terrain de haut grade métamorphique : Le cas des bassins sédimentaires d'Opinaca-Némiscau, Baie-James. Rapport, projet CONSOREM 2007-07, 36 p.
- Larouche, J. (2005). Caractérisation de la minéralisation de la fosse J4 à la mine Troilus, Chibougamau. Mémoire de maîtrise, UQAC, p165.
- Lavoie, J. (2017). Sous-province de l'Opatika : nouveau territoire pour l'exploration minérale. Rapport CONSOREM 2016-01, 85 p.
- Li, Youlian; Zhang, H., Guo, J., Li, Chaofeng (2017). Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton : A highly fractionated albite granite forced by K-feldspar fractionation. *Chem. Geol.*, 450, 165-182.



- Lowell, J.D., Guilbert, J.M. (1970). Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65, 373-408.
- Magnan, M. (1993). La zone 87 du gisement d'or et de cuivre du lac Troilus : pétrolographie et géochimie. Mémoire de maîtrise, UQAC, 188p.
- Mercier-Langevin, P., Daigneault, R., Goutier, J., Dion, C., Archer, P. (2012). Geology of the Archean intrusion-hosted La-Grande-Sud Au-Cu prospect, La Grande subprovince, James Bay region, Québec. *Eco. Geol.*, 107, 935-962.
- Middlemost, E.A.K. (1985). *Magmas and magmatic rocks : an introduction to igneous geology*. Essex, Longman Group Ltd, p550.
- Morfin, S. (2014). Influence de la mise en place persuasive de magma d'anatexie sous forme de complexe d'injection dans la croûte continentale. Thèse, p267.
- Mortensen, J.K., Ciesielki, A. (1987). U-Pb zircon and sphene geochronology of Archean plutonic and orthogneissic rocks of the James Bay region and Bienville Domain, Quebec; in *Radiogenic Age and Isotopic Studies*. Report 1, Geological Survey of Canada, 87-2, 129-134.
- Moukhsil, A. (2000). Géologie de la région des lacs Pivert, Anatacau, Kauputauchechun et Wapamisk (SNRC 33C/01, 33C/02, 33C/07 et 33C/08) – RG 2000-04, MRNFQ.
- Moukhsil, A et Legault, M. (2002). Géologie de la région de la Basse-Eastmain occidentale (33D/01, 33D/02, 33D/07 et 33D/08) – RG 2002-09, MRNFQ.
- Moukhsil, A., Voicu, G., Dion, C., David, J., Davis, D.W. et Parent, M. (2001). Géologie de la région de la Basse-Eastmain centrale (33C/03, 33C/04, 33C/05 et 33C/06) - RG 2001-08, MRNFQ.
- Mulja, T. (1995). Magmatic and hydrothermal processes in rare-element granite-pegmatite systems: the Preissac-Lacorne batholith, Québec, Canada. Thèse, McGill University, p370.
- Murakami, H., Seo, J.H., Heinrich, C.A. (2010). The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu-Au \pm Mo deposits. *Min. Dep.*, 45, 11-21.
- Phillips, G.N., and Powell, R. (2015). A practical classification of gold deposits, with a theoretical basis. *Ore Geol. Rev.*, 65, 568-573.
- Pearson, V. (2007). Fertilité des petites ceintures de roches vertes archéennes. Rapport, projet CONSOREM 2001-01, 134 p.
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. Chapter Skarn systems, p535-580. Springer Dordrecht, p1250.
- Ravenelle, J.F., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Nadeau, L., Simoneau, J., Bécu, V., Gauthier, M., Bandyayera, D. (2008). Géologie, structure et hydrothermalisme du gisement aurifère de classe mondiale Roberto, propriété Éléonore, Baie-James, Québec. DV 2008-06, MRNFQ, p24.
- Ravenelle, J.F., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Nadeau, L., Simoneau, J. (2010). Insights on the geology of the world-class Roberto gold deposit, Éléonore property, James Bay area, Québec. Geological Survey of Canada, Current Research 2010, p26.
- Ravenelle, J.F. (2013). Amphibolite facies gold mineralization : an example from the Roberto deposit, Eleonore propert, James Bay, Québec. Thèse de doctorat, UQAC, p325.
- Remick, J.H. (1977). Wemindji area (Municipality of James Bay). Preliminary report. Ministère des Richesses naturelles, Québec. DVP 446, p51.
- Robert, F. (2001). Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Min. Dep.*, 36, 503-516.
- Rollinson, H.R. (1993). *Using geochemical data : evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, London.
- Routhier, P. (1963). Les gisements métallifères - Géologie et principes de recherche. Paris, Masson et Cie, 1, 447-496.



- Samake, B., Xu, Y.M., Jiang, S.Y. (2018). Oxygen fugacity, temperature and pressure estimation from mineral chemistry of the granodiorite porphyry from the Jilongshan Au-Cu deposit and the Baiguoshu prospecting area in SE Hubei Province : A guide for mineral exploration. *Journal of Geo. Explo.*, 184, 136-149.
- Sillitoe, R.H. (1991). Intrusion-related gold deposits. In : Foster, R.P. (ed) *Gold metallogeny and exploration*. Blackie, Glasgow, p165-209.
- Sinclair, W.D., Drummond, A.D., Carter, N.C., Dawson, K.M. (1982). A preliminary analysis of gold and silver grades of porphyry-type deposits in western Canada; In *Precious Metals in the Northern Cordillera*, (ed.) A.A. Levinson; The Association of Exploration Geochemists, 157-172.
- Sinclair, W.D. (2007). Porphyry deposits, 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, 223-243.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), pp. 1-33
- Thompson, J.F.H., Sillitoe, R.H., Baker, T., Lang, J.R., Mortensen, J.K. (1999). Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34, 197-217.
- Thompson, J.F.H., Newberry, R.J. (2000). Gold deposits related to reduced granitic intrusions. *Reviews in Economic geology*, 13, 377-400.
- Tkachiev, A.V. (2011). Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time. From : Sial, A.N., Bettencourt, J.S., De Campos, C.P., Ferreira, V.P. (2011). Granite-related ore deposits. *Geol. Soc. London*, 350, 7-23.
- Tremblay, L. (2013). Description pétrographique de dix échantillons de sondages, propriété Cheechoo. Rapport pétrographique IOS, projet 919, p92.
- Trépanier, S. (2011). Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'atération et du métasomatisme. Rapport, projet CONSOREM 2008-07, 209 p.
- Yang, X.M. (2017). Estimation of crystallisation pressure of granite intrusions. *Lithos*, 286-287, 324-329.
- Witt, W.K. (1992). Porphyry intrusions and albitites in the Bardoc-Kalgoorlie area, Western Australia, and their role in Archean epigenetic gold mineralization. *Can. J. Earth. Sci.*, 29, 1609-1622.

