



# Typologie des intrusions felsiques à intermédiaires pour l'exploration à l'Archéen

Par Morgane Gigoux Ph. D.

**Projet 2018-02 (phase 1)**  
**Projet 2019-01 (phase 2)**

---

## 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 géologique, 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., 2020. Typologie des intrusions felsiques à intermédiaires pour l'exploration à l'Archéen. Rapport, Projet CONSOREM 2018-02 et 2019-01, 43 p.*

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 du CONSOREM.

### CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi  
555, boulevard de l'Université  
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : [consorem@uqac.ca](mailto:consorem@uqac.ca)

Site Web: [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

### Première phase :

Ce projet propose de nouvelles approches de discrimination et de classification des plutons pour l'exploration à l'Archéen. Elles s'inspirent notamment des travaux récents en Europe, sur des exemples sud-africains et indiens (Moyen, 2011; Laurent *et al.*, 2014; Moyen *et al.*, 2018).

Bien qu'ils possèdent un potentiel minier important, les plutons de l'Abitibi restent mal connus. Deux familles ont été étudiées au cours de ce projet, les types tonalite-trondhjémite-granodiorite (TTG) et les sanukitoïdes (SNK). Ce travail est basé sur un ensemble de données lithogéochimiques et géochronologiques déjà disponibles pour plusieurs plutons répartis sur tout le territoire abitibien (système d'information géominière du Québec [SIGÉOM], compagnies membres, travaux universitaires, projets CONSOREM). Trois approches ont été plus spécifiquement utilisées : 1) l'utilisation des pressions de cristallisation des magmas selon la méthode de Yang (2017); 2) la détermination des sources dans des diagrammes de classification géochimiques utilisant les éléments majeurs et traces (Laurent *et al.*, 2014; Moyen, 2019); 3) l'utilisation de la classification du potentiel métallogénique des rhyolites (Leshner *et al.*, 1985; Hart *et al.*, 2004; Gaboury et Pearson, 2008).

L'étude de 30 plutons, attribués à la famille des TTG, montre qu'il existe deux familles distinctes. Les plutons FIII, plus riches en éléments à champ d'intensité élevé (HFSE, p. ex. Y, Nb, Yb), qui sont associés aux plus gros camps à amas sulfurés volcanogènes d'Abitibi (Matagami et Noranda). Les plutons FI sont appauvris en éléments incompatibles. Ils sont surtout situés au nord-est de l'Abitibi. Leurs sources semblent globalement plus profondes que celles des plutons du sud de la sous-province mais la profondeur varierait dans le temps. L'idée novatrice de ce projet a été l'utilisation des pressions de cristallisation appliquée aux granitoïdes TTG à partir de la méthode de Yang, (2017). Ce critère permet d'appuyer les différences qui existent entre le sud-ouest et le nord-est de la sous-province, déjà visibles à travers les données géochimiques. Au NE, les plutons de type FI indiquent des épaisseurs crustales plus importantes avec des pressions de cristallisation statistiquement plus élevées, typiques d'un contexte d'arc magmatique. Il existe cependant des plutons FI de faibles pressions de cristallisation qui démontrent un intérêt particulier pour l'exploration de minéralisations épithermales à porphyriques, comme le pluton de Chibougamau. Au SO, les plutons FIII sont associés à des pressions plus faibles (< 2 kbar) et à des profondeurs de cristallisation globalement inférieures à 6-7 km. Ces résultats ont une implication sur l'interprétation de la géodynamique globale en Abitibi et permettent d'apporter des éléments clés importants dans la compréhension des profondeurs de mise en place des intrusions dites « syn-volcaniques » et « syn-tectoniques » à l'Archéen.

Les intrusions tardi-orogéniques d'affinités alcalines sont reconnues pour être associées à des minéralisations aurifères. Elles ont fait l'objet d'une étude comparée de leurs caractéristiques géochimiques sur la base des diagrammes existants (Laurent *et al.*, 2014) et de nouveaux diagrammes sur les éléments traces les plus discriminants. Il est ainsi possible de mettre en évidence trois différents types de sanukitoïdes en Abitibi : les

signatures de 1) Beattie-East-Sullivan., 2) Malartic-Bachelor et 3) Kirkland-Lake. Les signatures des intrusions de Beattie, East-Sullivan, et Granada semblent comparables à celui du « Closepet-type » (sanukitoïdes HKCA) décrit par Moyen (2019). Ces intrusions sont majoritaires au sud de l'Abitibi, mais une étude plus approfondie des petits stocks syénitiques tardi-orogéniques au nord de la sous-province serait nécessaire afin d'en tirer des conclusions plus pertinentes pour l'exploration. La complexité géochimique de ces magmas, issus d'un manteau métasomatisé hétérogène avec plus ou moins d'assimilation crustale, rend difficile la discrimination de ces intrusions.

Les nouveaux diagrammes (classification et fertilité) proposés dans ce projet ont été spécifiquement construits à partir des signatures archéennes des plutons de la Sous-province de l'Abitibi. Il reste donc à les valider pour d'autres sous-provinces ou provinces archéennes dans le monde.

### Seconde phase :

Ce travail fait suite au projet 2018-02 qui proposait de nouvelles approches de discrimination et de classification des plutons pour l'exploration à l'Archéen. Les outils développés lors de ce projet avaient été appliqués avec succès à la classification et la métallogénie des plutons de l'Abitibi. Le but du projet 2019-01 est d'exporter cette méthodologie pour caractériser les intrusions à la Baie-James, l'objectif étant de proposer une cartographie des intrusions en fonction de leur classification et typologie, et de faire ressortir des environnements métallogéniques favorables. En parallèle, un travail a été effectué pour améliorer la compréhension des différents diagrammes de classification, et notamment le diagramme ternaire de Laurent *et al.* (2014).

Les typologies des intrusions à la Baie-James sont encore peu documentées, surtout pour les intrusions pouvant appartenir à la famille des sanukitoïdes (SNK). Pour traquer ces signatures à la Baie-James, la stratégie adoptée a été de prendre pour référence les premiers travaux effectués sur les SNK archéens (Stern *et al.*, 1989; Stevenson *et al.*, 1999) qui ont été réalisés en Ontario dans la Sous-province à dominante plutonique de Wabigoon, un équivalent latéral probable de la Sous-province de La Grande au Québec (Percival *et al.*, 2012). La composition géochimique des premières suites SNK archéennes a été importée dans le diagramme ternaire de Laurent *et al.* (2014) et elles correspondent bien au champ des SNK archéens. Il est donc justifié d'utiliser ce diagramme à la Baie-James pour identifier ce type de signature à partir de la base de données du SIGÉOM.

À la Baie-James (feuillet 32J à 33H pour ce projet), le diagramme de Laurent *et al.* (2014) permet de reconnaître l'appartenance à la famille des SNK pour 526 échantillons de monzodiorite, monzonite, syénite et certains granites alcalins (déterminés d'après Middlemost, 1985). Certains échantillons de syénites et de granites alcalins montrent une distribution particulière dans le diagramme ainsi que de fortes teneurs en K<sub>2</sub>O associées à un degré de différenciation élevé. Il est intéressant de noter que la répartition de l'ensemble des échantillons de type syénites riches en K se localisent au niveau de la syénite d'Amisquioumisca (2686 Ma) dans la Sous-province d'Opatica. Il y a très peu de syénite à la Baie-James, la dominante étant la présence de monzodiorite-monzonite.

Un second volet a permis de visualiser la distribution des signatures géochimiques de plusieurs intrusions associées à des gîtes et gisements minéralisés du territoire dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014) On aperçoit deux tendances : 1) sodique à alumineuse et 2) ferro-magnésienne à plus différenciée. À noter que la première tendance correspond essentiellement aux signatures du domaine tonalite-trondhjémite-granodiorite (TTG) avec les gîtes de La Grande-Sud, Tilly, Marmion (Sous-province de Wabigoon) et Cheechoo (faciès porphyrique). La seconde tendance dans les champs hybrides à SNK du diagramme correspond à la distribution des gîtes de Mythril, de Ménarik et des intrusions de diorite-tonalite d'Éléonore. En parallèle, la base de données lithogéochimiques des porphyres Cu-Au mondiaux (projet CONSOREM 2011-07, S. Faure) a été testée dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014). Il en ressort des tendances en fonction du ratio Cu/Au et des cortèges métalliques associés. Globalement, le champ SNK va correspondre à des chimies plus mafiques et oxydées avec des minéralisations plus riches en Cu ± Au ± Mo, celui des TTG à des échantillons plus riches en Au ± Cu, tandis que le champ des granites à biotite correspond à des chimies réduites et différenciées à Cu-Mo-W. Plus de 80% des échantillons des gîtes de Mythril, Ménarik et Éléonore ont des chimies comparables à la base de données des porphyres Cu-Au mondiaux.

À partir de la classification des échantillons plutoniques du SIGÉOM et des signatures des différentes intrusions minéralisées à la Baie-James, plusieurs ciblage ont été effectués par quatre méthodologies distinctes. Deux d'entre eux ont été réalisés à partir de la chimie des signatures SNK identifiées en Abitibi dans la première phase du projet, type « Beattie » et type « Malartic ». Les deux autres ont été réalisés à partir de la signature de la récente découverte de Mythril (Cu-Au-Mo) et des travaux de Chariadia (2020) sur les caractéristiques géochimiques des porphyres Cu-Au récents. Les deux grandes familles TTG et SNK ont été travaillées et ciblées avec succès dans ce projet. Dans le détail, 11 cibles de type TTG et 10 cibles de type SNK (potentiels) ont été suggérées sur le territoire de la Baie-James.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

Avertissement .....	2
Résumés (phases 1 et 2) .....	3
Liste des figures.....	7
<u>INTRODUCTION</u> .....	9
<u>1 CLASSIFICATION GÉNÉTIQUE RÉCENTE DES INTRUSIONS À L'ARCHÉEN</u> .....	11
1.1 Définition et nomenclature .....	11
<u>2 NOUVELLES APPROCHES DE CLASSIFICATION</u> .....	14
2.1 Utilisation de diagrammes existants établis pour l'Archéen .....	14
2.2 Pressions de cristallisation .....	18
2.2.1 Application aux plutons TTG en Abitibi.....	19
2.2.2 Plutons syn-volcanique et plutons syn-tectoniques.....	22
2.3 Réflexions et discussion .....	23
<u>3 APPLICATION À LA BAIE-JAMES (PHASE 2)</u> .....	27
3.1 Retour sur le diagramme ternaire de Laurent et al. (2014) .....	27
3.2 Stratégie de classification des intrusions à la Baie-James .....	28
3.3 Les intrusions minéralisées à la Baie-James .....	32
3.4 Cartographie et ciblage.....	35
<u>CONCLUSION</u> .....	39
<u>REMERCIEMENTS</u> .....	39
<u>RÉFÉRENCES</u> .....	40

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : A : Variations des rapports en éléments majeurs et traces pour les roches felsiques au cours des temps géologiques d'après Keller et Schoene (2012); B : Différences entre les signatures des TTG archéens et les granitoïdes post-archéens du Massif Central d'après Moyen (2011).

Figure 2 : Tableau synthétique des projets du CONSOREM qui se sont intéressés à la discrimination géochimique des intrusions entre 2001 et 2017.

Figure 3 : Diagramme 3D de la classification génétique des principales typologies d'intrusions à l'Archéen (Moyen, 2019).

Figure 4 : A : Carte mondiale de la répartition des endroits où des sanukitoïdes ont été reconnus associés aux cratons archéens (Heilimo *et al.*, 2010); B : Processus de formation des magmas de type Closepet (Moyen, 2000).

Figure 5 : Compilation des caractéristiques géochimiques (éléments majeurs et traces) des intrusions de type sanukitoïdes et des types A (anorogénique ou alcalin) d'après les données de la littérature.

Figure 6 : Synthèse géodynamique et métamorphique de l'histoire géologique du craton Yilgarn d'après Goscombe *et al.* (2009). Le lien génétique entre l'or et la mise en place de syénites mafiques entre 2665 et 2655 Ma est explicitement suggéré.

Figure 7 : Diagramme ternaire de Laurent *et al.* (2014) et ses trois champs principaux, construit à partir des signatures archéennes de plusieurs cratons archéens du monde.

Figure 8 : Répartition des plutons étudiés en Abitibi dans le cadre de ce projet. Les couleurs permettent globalement de les dissocier en fonction de leur répartition géographique (rouge au SE, jaune au NE et bleu au NO).

Figure 9 : Synthèse de la répartition des compositions des intrusions TTG (en gris) et SNK (en rose) en Abitibi (Québec et Ontario)

Figure 10 : Relation entre la typologie des rhyolites et les environnements géodynamiques associés.

Figure 11 : Signature des intrusions de type TTG en Abitibi en fonction des critères géochimiques utilisés pour la classification des rhyolites (La/Yb et anomalie en Eu). Signature en ETR moyenne des typologies FIII (en rouge) et FI (en jaune). Les couleurs de chaque point correspondent à la légende de la carte de répartition des plutons étudiés dans ce projet (Figure 8).

Figure 12 : Teneurs en Y des intrusions en fonction de leur âge.

Figure 13 : Distribution des pressions de cristallisation en kbar calculées à partir de la méthode de Yang (2017)

Figure 14 : Distribution des pressions en fonction de l'âge des plutons. A : en fonction de leur localisation géographique; B : en fonction de leur typologie.

Figure 15 : Distinction des plutons syn-volcaniques et syn-tectoniques en Abitibi en fonction des pressions de cristallisation et des âges de cristallisation.

Figure 16 : Diagramme binaire d'éléments traces incompatibles, Nb en fonction de Y (ppm), en fonction des typologies et des âges des intrusions.

Figure 17 : Nouveau diagramme ternaire considérant trois critères les plus discriminants pour distinguer les typologies FI et FIII.

Figure 18 : Synthèse géochronologique des intrusions alcalines (certaines appartenant à la famille des SNK) en Abitibi à l'Archéen (Goutier, *inédit* 2012).

Figure 19 : Diagrammes binaires d'éléments traces et signatures géochimiques des intrusions de type SNK en Abitibi. Données issues de Bigot et Jébrak (2015); Bigot, F. (*inédit*); Fayol *et al.* (2017); Helt (2012); SIGÉOM.

Figure 20 : Distribution des pressions de cristallisation en kbar calculées à partir de la méthode de Yang (2017).

Figure 21 : A : Distribution des échantillons de roche de la base de données GEOROC (<https://georoc.eu/>; n = 5 810) dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014); B : sélection des échantillons de contexte de marge convergente seulement en fonction de leurs teneurs en K<sub>2</sub>O (%).

Figure 22 : Distribution géochimique des échantillons de roche de type SNK dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014) d'après les données de Stevenson *et al.* (1999).

Figure 23 : A : Distribution géochimique des échantillons ignés les moins altérés (n = 7017, SIGÉOM) en fonction de leur classification lithologique (Middlemost, 1985 modifié par Lafrance, 2011); B : sélection des échantillons des feuillettes 32J à 33H (n = 526); C : teneurs en K<sub>2</sub>O des échantillons sélectionnés (%); D : degré de différenciation des échantillons via le rapport Zr/TiO<sub>2</sub>.

Figure 24 : Distribution spatiale des échantillons A : de granites alcalins et de syénites ultra-K; B : du champ SNK du diagramme de Laurent *et al.* (2014) C : des tonalites-granodiorites; D : du champ TTG du diagramme de Laurent *et al.* (2014), en bleu. Les échantillons blancs représentent la répartition de l'ensemble des échantillons ignés les moins altérés.

Figure 25 : Distribution des données lithogéochimiques dans le diagramme de Laurent *et al.*, des gîtes et gisements minéralisés à la Baie-James (Sous-province de La Grande). Un seul gisement aurifère est localisé dans la Sous-province de Wabigoon (Hammond Reef).

Figure 26 : A : Distribution de l'ensemble des données lithogéochimiques de la base de données de porphyres mondiaux (projet CONSOREM 2011-07, S. Faure et S. Trépanier); B : Sélection des échantillons les moins altérés et leur ratio Cu/Au; C : Tonnage en Mt, les plus forts tonnages étant globalement distribués dans l'enveloppe pointillée noire.

Figure 27 : Diagrammes binaires d'éléments traces issus des travaux de Laurent *et al.* (2014) et diagramme de fertilité d'après les travaux de Lafrance (2011). La signature de Beattie est en bleu.

Figure 28 : Diagrammes binaires d'éléments traces issus des travaux de Laurent *et al.* (2014) et signature de Myhril en violet.

Figure 29 : Nouveau diagramme binaire de fertilité basé sur les rapports Sr/Y des plus gros porphyres Cu-Au récents (50 < Sr/Y < 150) et les rapports La/Yb des plutons FI de basses pressions d'Abitibi (Chibougamau et Nomans).

Figure 30 : Secteurs de faibles pressions de cristallisation (kbar). 1) Sakami-Ménaric : granite daté à 2699 Ma associé à une pression de 1,3 kbar; 2) Myhril : granite daté à 2708 Ma associé à une pression de 1,9 kbar; 3) Amisquiomisca : granite daté à 2678 Ma associé à une pression de 1,6 kbar.

---

## INTRODUCTION

---

L'importance de l'identification des bonnes signatures géochimiques pour les intrusions en contexte d'exploration minière n'est plus à démontrer. Les intrusions jouent très souvent un rôle indispensable dans le processus de minéralisation (Au, Ni, Cu, Zn, Li, W, etc.), que ce soit en tant que 1) moteur thermique (sulfures massifs volcanogènes à or), 2) encaissant compétent (veines orogéniques) ou encore comme 3) source des fluides et des métaux (porphyres).

Le principal obstacle à cette classification est la difficulté éprouvée à classer les plutons archéens, principalement due à la forte controverse des diagrammes de discrimination utilisés de façon systématique, établis à partir de signatures géochimiques post-archéennes. Il est désormais convenu que la composition de la croûte archéenne (Moyen, 2011; Keller et Schoene, 2012; Figure 1A et B) et que les mécanismes de fusion partielle étaient différents à l'Archéen, avec un manteau moins évolué que celui d'aujourd'hui associé à des flux de chaleur interne probablement plus intenses.

Le projet propose ici une approche originale pour une classification spécifiquement développée pour les intrusions archéennes avec un objectif principal qui est de préciser la nature probable d'une intrusion intermédiaire à felsique à partir d'un ou plusieurs échantillons peu altéré(s) prélevés sur le terrain au cours d'une campagne d'exploration.

La problématique de la classification des granites à l'Archéen est bien développée en Europe depuis plusieurs années (Moyen, 2000; Moyen, 2011; Laurent *et al.*, 2014; Moyen *et al.*, 2018). Au CONSOREM, 18 projets se sont intéressés de près ou de loin à développer des outils de discrimination géochimiques (classification magmatique, environnement tectonique, altération/métasomatisme, métamorphisme, critère de fertilité), répartis entre 2001 et 2017 (Figure 2). Une grande majorité des résultats (diagramme de classification et/ou de fertilité) a été intégrée à LithoModeleur, un logiciel propriétaire qui regroupe l'essentiel des outils lithogéochimiques développés au CONSOREM.

L'intérêt de ce projet est de proposer de nouveaux diagrammes de classification pour les plutons archéens à partir des récents travaux de Moyen (2019) notamment.

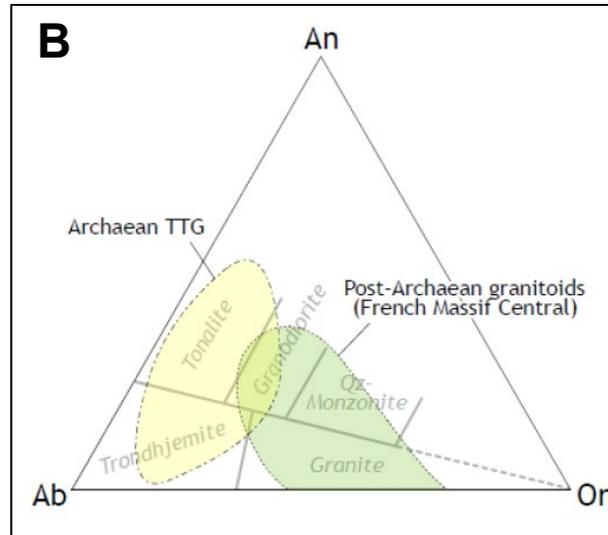
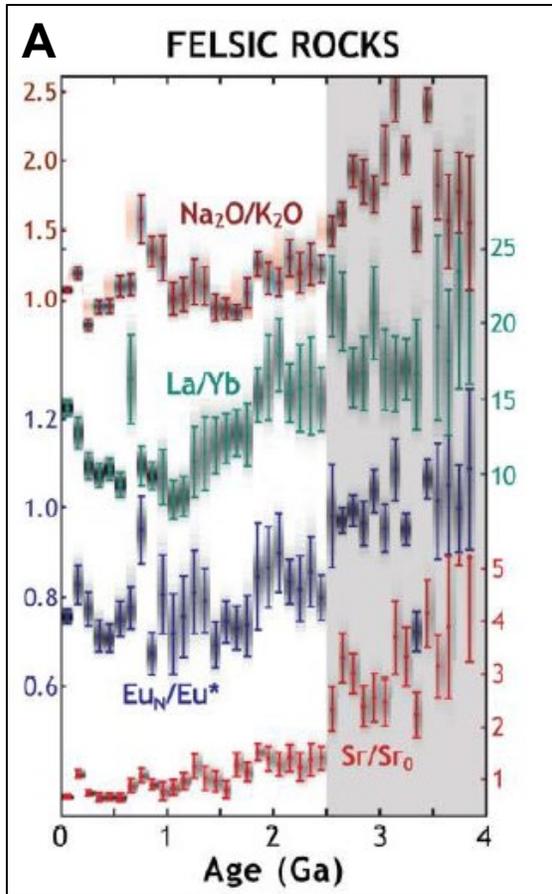


Figure 1 : A : Variations des rapports en éléments majeurs et traces pour les roches felsiques au cours des temps géologiques d'après Keller et Schoene (2012); B : Différences entre les signatures des TTG archéens et les granitoïdes post-archéens du Massif Central d'après Moyen (2011).

		Discrimination géochimique		
TEMPS	Projet 2001-03	D. Gaboury	Syn-volc vs syn-tecto	Abitibi
	Projet 2001-07	S. Faure	Porphyre	Abitibi, Zimbabwe, Australie
	Projet 2003-05	D. Gaboury	Critères de fertilité	Abitibi
	Projet 2004-02	V. Pearson	Critères de fertilité	Abitibi
	Projet 2005-01	S. Faure, S. Trépanier	Syn-volc vs syn-tecto + Altération	Abitibi
	Projet 2006-02	S. Faure	Plutons felsiques intermédiaires	Abitibi
	Projet 2007-02	C. Sasseville	Intrusions alcalines	Abitibi
	Projet 2008-07	S. Trépanier	Outil lithomodeleur	
	Projet 2009-05	B. Lafrance	IOCG	Abitibi
	Projet 2009-09	S. Trépanier, S. Faure	Ignée vs Sédimentaire	Québec, Ontario, France
	Projet 2011-02	B. Lafrance	Porphyre + Intrusions alcalines	Abitibi
	Projet 2011-03	B. Lafrance	Plutons felsiques	Grenville
	Projet 2011-07	S. Faure	Porphyre - Critères de fertilité	Grenville, Baie-James, Ashuanipi
	Projet 2012-02	S. Faure	Syn-volc vs syn-tecto	Abitibi
	Projet 2014-04	S. Rafini	Porphyre - Critères de fertilité	Gaspésie
	Projet 2014-05	L. Mathieu	Intrusions alcalines	Abitibi
Projet 2016-07	L. Mathieu	Altération	Abitibi, Baie-James	
Projet 2017-03	M. Gigoux	Pression cristallisation	Baie-James	

Figure 2 : Tableau synthétique des projets du CONSOREM qui se sont intéressés à la discrimination géochimique des intrusions entre 2001 et 2017.

# 1. CLASSIFICATION GÉNÉTIQUE RÉCENTE DES INTRUSIONS À L'ARCHÉEN

## 1.1 Définition et nomenclature

La récente classification des intrusions proposée par Moyen (2019) est une classification génétique qui repose sur la discrimination de la source des magmas. Son diagramme 3D (Figure 3) est basé sur deux axes horizontaux représentant l'évolution de l'aluminosité du magma et l'évolution de la source mantellique (manteau appauvri vers un manteau primitif ou « enrichi »). L'axe vertical représente le degré de différenciation du magma. Le pendage des blocs caractérisant les différentes typologies des intrusions va retranscrire les différents processus d'évolution du magma (cristallisation fractionnée, assimilation, mélange, etc.). Ce diagramme permet de distinguer les deux grands types d'intrusions « C-type » et « M-type ». Les intrusions de type TTG vont appartenir au C-type, avec une composante crustale dominante tandis que les sanukitoïdes vont appartenir au M-type avec une composante mantellique dominante. Le terme « sanukitoïde » a été proposé pour des granitoïdes archéens qui ont des compositions similaires aux andésites d'âge miocène riche en Mg reconnues dans les années 80 dans la ceinture de Setouchi au Japon et qui avaient été appelés sanukites (Tatsumi et Ishizaka, 1982). Un sanukitoïde *sensu stricto* est une monzodiorite à granodiorite riche en Mg et HFSE (+ Ba, Ni et Cr) à tendance métallumineuse, mélanocrate et d'affinité à dominante alcaline.

Au sein des sanukitoïdes, les travaux de Moyen (2019) permettent de distinguer deux types de sanukitoïdes : 1) les sanukitoïdes *sensu stricto* et 2) les sanukitoïdes HKCA (high-K calc-alcaline granitoid). Les HKCA ont également été appelés « Closepet-type », en référence à l'endroit où l'intrusion a été découverte, au sud du Craton de Dharwar (Figure 4A). Ce granitoïde a été daté à 2.52 Ga et serait issu en partie de la fusion partielle d'un manteau métasomatisé à la fin de l'Archéen et d'une probable contamination de magma TTG (Figure 4B). C'est un magma riche en K, HFSE (Nb, Y, Zr) et en éléments mafiques (Moyen, 2000). Ce type d'intrusion a également été identifié dans la province du Supérieur dans les Sous-provinces de Wabigoon, Wawa et Quetico (Moyen, 2000). Il s'agit de rares intrusions encore mal caractérisées et d'âges hétérogènes (entre 2700 et 2665 Ma; Stevenson *et al.*, 1999).

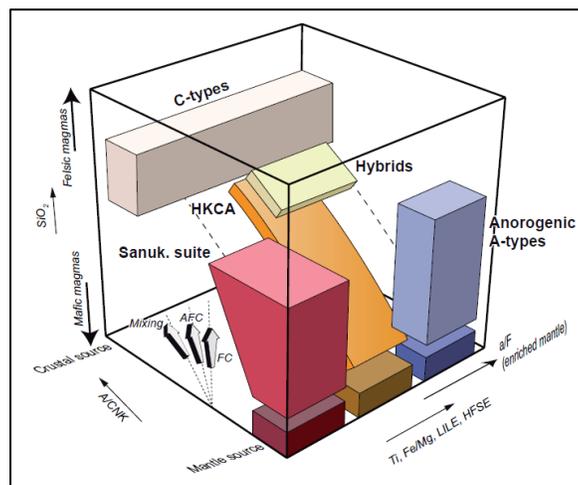


Figure 3 : Diagramme 3D de la classification génétique des principales typologies d'intrusions à l'Archéen (Moyen, 2019).

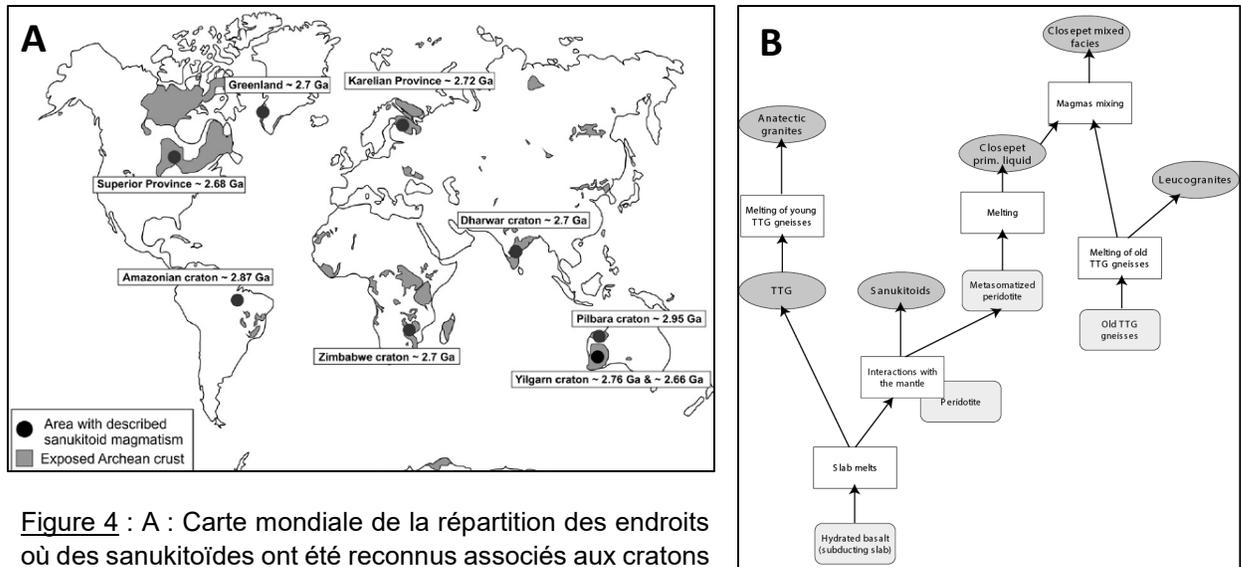


Figure 4 : A : Carte mondiale de la répartition des endroits où des sanukitoïdes ont été reconnus associés aux cratons archéens (Heilimo *et al.*, 2010); B : Processus de formation des magmas de type Closepet (Moyen, 2000).

Les sanukitoïdes HKCA sont des intrusions légèrement plus différenciées, à tendance leucocrate et parfois d'affinité calco-alkaline. Les critères géochimiques de discriminations ont été résumés dans la Figure 5. Les intrusions « A-type » sont décrites comme étant des magmas alcalins associés aux points chauds ou rifts continentaux (Loiselle et Wones, 1979; Whalen *et al.*, 1987; Bonin, 1990). Ce sont des magmas anorogéniques, qui a priori n'existent pas encore à l'Archéen. Néanmoins les travaux de Mitrofanov *et al.* (2000) semblent avoir identifié le plus vieux granite de type A localisé sur le craton fennoscandinave, dont la mise en place est estimée entre 2680-2610 Ma. Ses caractéristiques ont été comparées aux sanukitoïdes. Les critères ont été compilés à partir des travaux de Moyen (2000), Beakhouse (2011), Zozulya et Eby (2006) et Mikhailova *et al.* (2017).

Il existe une confusion systématique entre la source et l'affinité magmatique des intrusions. Il y a celles dites alcalines par leur source et celles dont l'affinité magmatique a été identifiée comme alcaline. Dû à l'hétérogénéité de leur source impliquant une complexité chimique des magmas de type sanukitoïdes, il est encore très compliqué de classer clairement ces intrusions hybrides. Certaines syénites alcalines en Abitibi sont reconnues comme appartenant à la famille des sanukitoïdes, comme Beattie (Bigot et Jébrak, 2015).

Le lien spatial entre les intrusifs syénitiques tardi-archéens et l'or est bien établi en Abitibi (Robert, 2001). La connexion entre une source mantellique et les affinités aurifères des intrusions « M-type » est également suggérée (Azevedo, 2015; Blevin *et al.*, 1992; Moyen, 2014). L'équipe de Goscombe *et al.* (2009) évoque explicitement une source mantellique pour l'or qui est associé à la mise en place des syénites et granites mafiques sur le craton Yilgarn entre 2665 et 2655 Ma, à la fin de l'Archéen (Figure 6).

	Sanukitoïdes s.s *	Autres sanukitoïdes		A-type *** «Fennoscandian» Ex: Keivy massif granite peralcalin, syénite à néphéline
		HKCA (Closepet-type) *	Stock d'Otto**, Eastern Goldfields granite	
Mg #	45 - 75	35 - 70	40 - 50	1 - 30
A/CNK	0.6 - 1	0.3 - 0.9	0.7 - 0.9	~ 0.9
K/Na	0.4 - 0.7	0.4 - 0.9	0.8 - 1.2	0.4 - 1.2
La <sub>n</sub>	100 - 300	150 - 500	< 100	150 - 1000
Yb <sub>n</sub>	1 - 10	5 - 20	< 10	30 - 40
Nb	5 - 10	10 - 20	< 5	> 20
Y	5 - 20	20 - 40	< 40	> 40
Zr	100 - 200	200 - 400	30 - 200	> 300
Ni	20 - 60	10 - 30	5 - 10	< 20
Cr	20 - 150	20 - 50	15 - 30	< 15
Ba	500 - 2000	800 - 2000	300 - 4500	< 500
Sr	400 - 1000	500 - 1500	300 - 3000	< 300

\*Moyen, 2000

\*\*Zozulya et Eby, 2006; Beakhouse, 2011

\*\*\* Zozulya et Eby, 2006; Mikhailova et al., 2017

Figure 5 : Compilation des caractéristiques géochimiques (éléments majeurs et traces) des intrusions de type sanukitoïdes et des types A (anorogénique ou alcalin) d'après les données de la littérature.

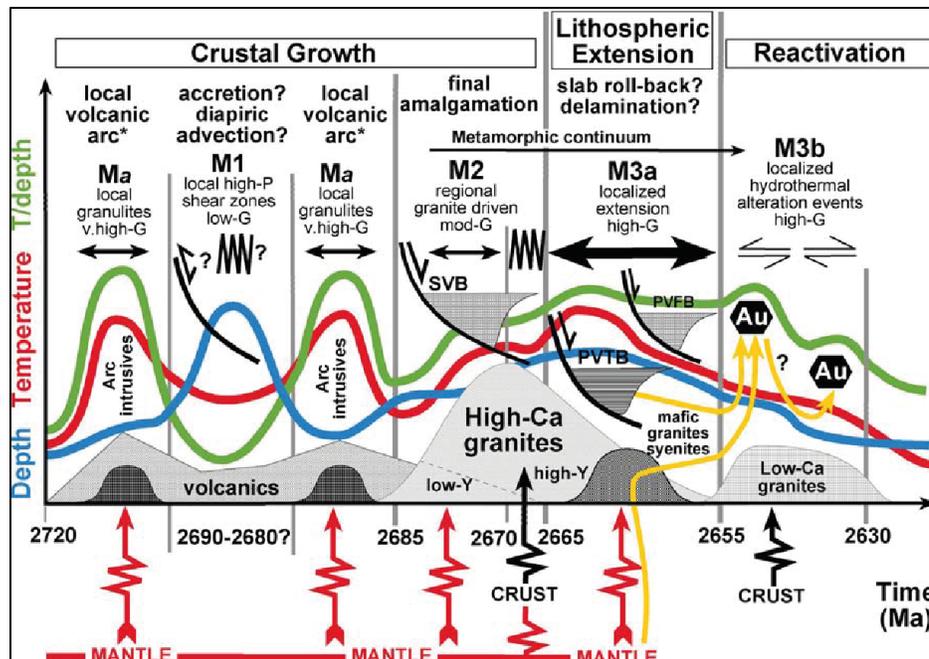


Figure 6 : Synthèse géodynamique et métamorphique de l'histoire géologique du craton Yilgarn d'après Goscombe *et al.* (2009). Le lien génétique entre l'or et la mise en place de syénites mafiques entre 2665 et 2655 Ma est explicitement suggéré.

## 2. NOUVELLES APPROCHES DE CLASSIFICATION

### 2.1 Utilisation de diagrammes existants établis pour l'Archéen

Les intrusions TTG et SNK appartiennent à deux familles bien distinctes associées à des caractéristiques bien distinctes. La première question de ce projet est de savoir s'il existe un diagramme qui permettrait de distinguer efficacement les intrusions C-type des intrusions M-type. Une partie de la réponse a été découverte dans les travaux de Laurent et al. (2014), qui proposent un diagramme ternaire de discrimination construit uniquement à partir de signatures archéennes de granitoïdes provenant de plusieurs cratons dans le monde (Figure 7). Ce diagramme permet clairement de distinguer trois domaines : 1) TTG, 2) SNK et 3) granite à biotite. Dans le détail de la base de données utilisée, très peu de données d'Abitibi ont été considérées. La question est donc de savoir si ce diagramme permet également de distinguer efficacement les signatures géochimiques des plutons en Abitibi. Pour se faire, une compilation de données lithogéochimiques a été effectuée sur une trentaine de plutons de type TTG (Figure 8) et une quinzaine de plutons type SNK, en Abitibi (Québec et Ontario). La synthèse des résultats est représentée par les enveloppes grises (TTG) et roses (SNK potentiels) sur la Figure 9.

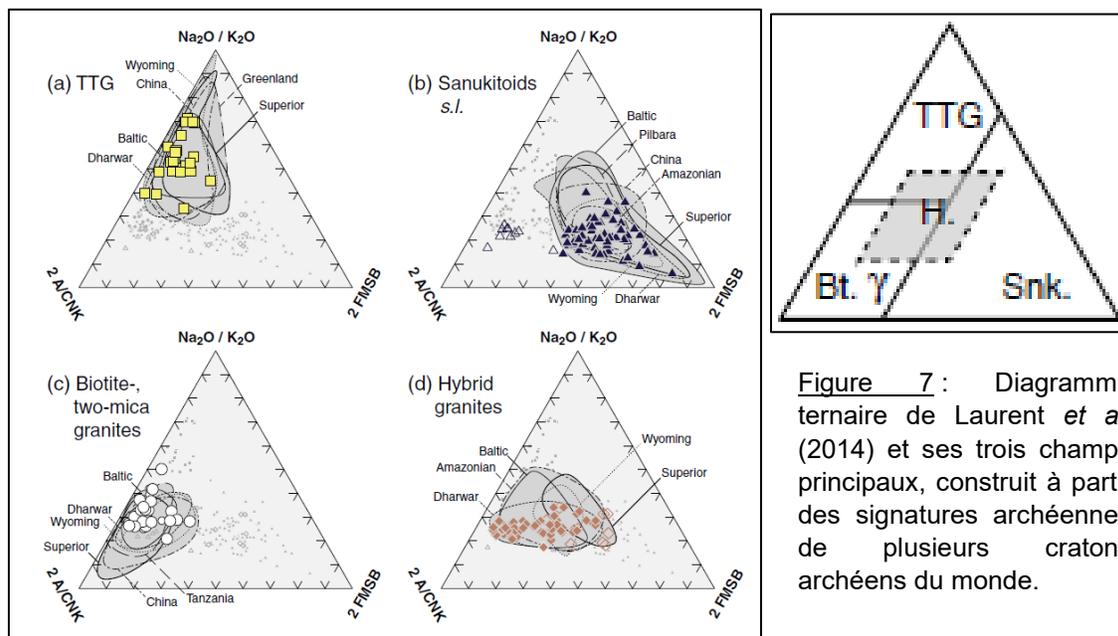


Figure 7 : Diagramme ternaire de Laurent *et al.* (2014) et ses trois champs principaux, construit à partir des signatures archéennes de plusieurs cratons archéens du monde.

$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  for melting of meta-igneous mafic rocks with low to moderate  $\text{K}_2\text{O}$  contents;  
 $\text{FMSB} ([\text{FeO}_t + \text{MgO}]_{\text{wt.}\%} * [\text{Sr} + \text{Ba}]_{\text{wt.}\%})$  for the interactions between peridotite and components rich in incompatible elements (in particular LILE); and  
 $\text{A/CNK}$  for melting of Al-rich, felsic crustal lithologies (TTGs, metasediments).

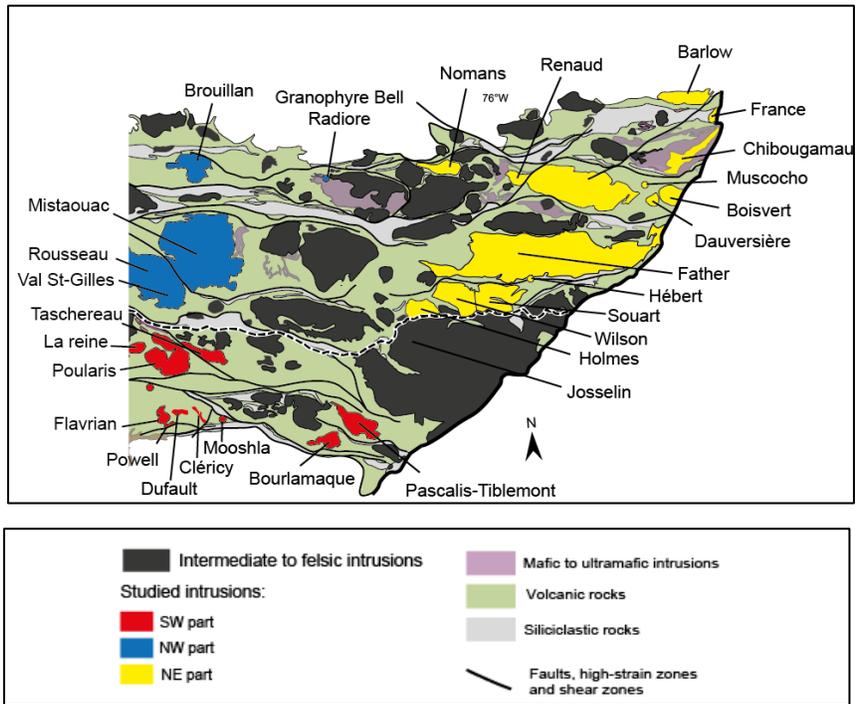


Figure 8 : Répartition des plutons étudiés en Abitibi dans le cadre de ce projet. Les couleurs permettent globalement de les dissocier en fonction de leur répartition géographique (rouge au SE, jaune au NE et bleu au NO).

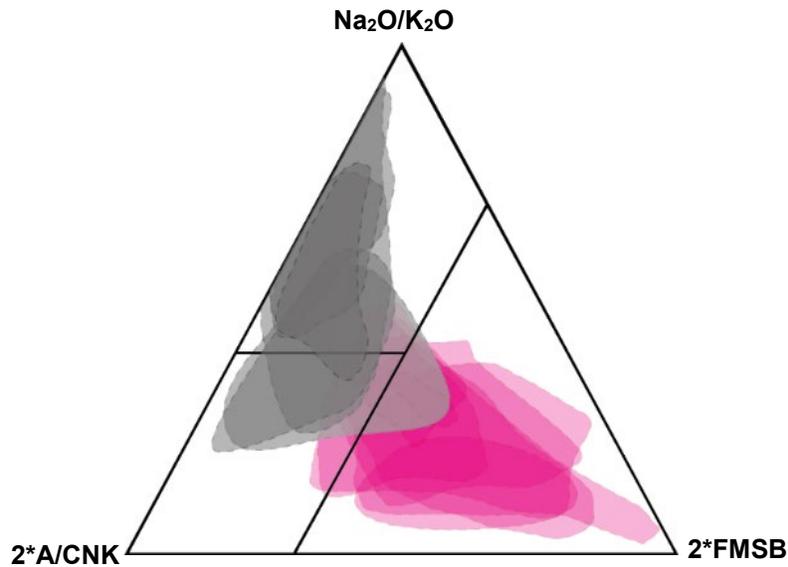


Figure 9 : Synthèse de la répartition des compositions des intrusions TTG (en gris) et SNK (en rose) en Abitibi (Québec et Ontario)

Une deuxième approche a été de s'intéresser à la classification établie pour les rhyolites (Leshner *et al.*, 1985; Hart *et al.*, 2004), repris par la suite dans les travaux de Gaboury et Pearson (2008) puis Huston *et al.* (2014). En résumé, chaque typologie (FI, FII et FIII) est associée à un environnement géodynamique particulier comme l'illustre la Figure 10 (Huston *et al.*, 2014). Les typologies FIII vont être rattachées à un environnement d'arrière-arc (contexte de croûte amincie), à un spectre des éléments des terres rares (ETR) plat parfois associé à une anomalie négative en europium, correspondant à une source peu profonde du magma et à la fusion du plagioclase dans la source. Par opposition, les typologies FI vont être rattachées à un contexte d'arc magmatique (croûte épaisse), à un spectre ETR fractionné (La/Yb élevé) interprété comme étant le reflet d'une source profonde du magma dans le domaine de stabilité du grenat (Figure 10).

L'idée testée dans ce projet a été d'appliquer ces critères pour les intrusions de type TTG et de porter attention à la signature des TTG connus pour être spatialement associés à des sulfures massifs volcanogènes (SMV) en Abitibi.

Pour commencer, un diagramme construit à partir de deux critères discriminants utilisés pour la classification des rhyolites a été utilisé (Figure 11) : L'intensité de l'anomalie en europium en fonction de  $(La/Yb)_n$ . Il est ainsi possible de discriminer les TTG de type FIII qui sont majoritairement localisés au sud de l'Abitibi (en rouge), des TTG de type FI, qui sont eux essentiellement regroupés au nord-est du territoire (en jaune). Parmi les types FIII, on va retrouver les plutons de Flavrian, Fabie et Powell, mais également la signature du granophyre du Complexe Bell de Matagami. Ce sont toutes des intrusions associées spatialement à des dépôts de SMV. Parmi les types FI, on va retrouver les plutons de Chibougamau et de Nomans par exemple. Les compositions en ETR des types FI sont globalement plus hétérogènes avec un rapport La/Yb variable. La source du magma de ces plutons est donc plus hétérogène et statistiquement plus profonde.

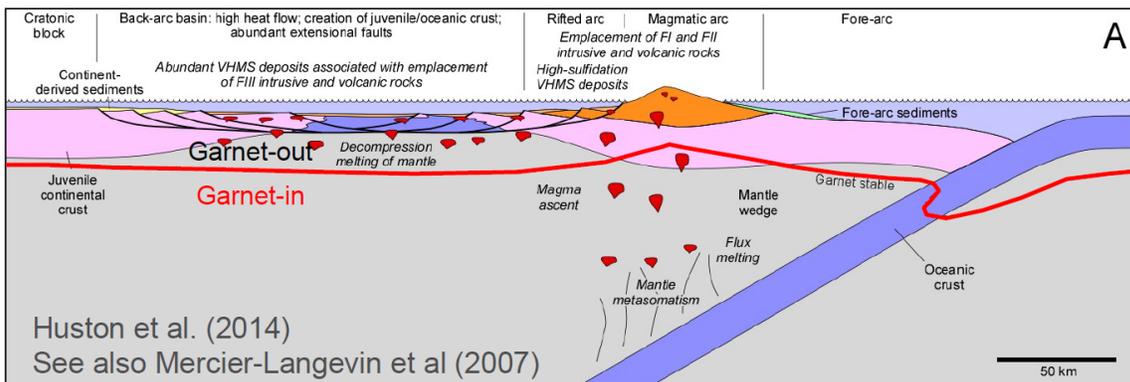
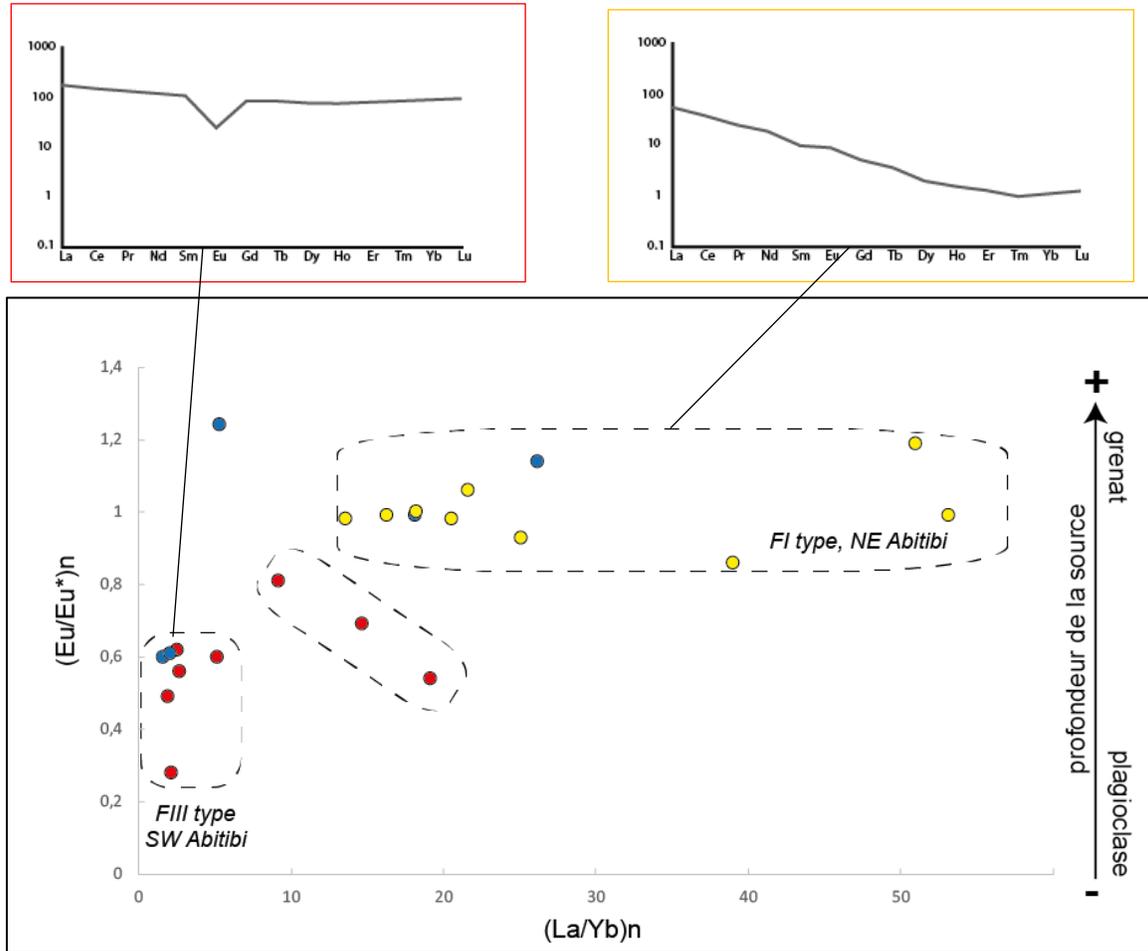


Figure 10 : Relation entre la typologie des rhyolites et les environnements géodynamiques associés.



**Figure 11** : Signature des intrusions de type TTG en Abitibi en fonction des critères géochimiques utilisés pour la classification des rhyolites ( $La/Yb$  et anomalie en Eu). Signature en ETR moyenne des typologies FIII (en rouge) et FI (en jaune). Les couleurs de chaque point correspondent à la légende de la carte de répartition des plutons étudiés dans ce projet (Figure 8).

La discrimination de la profondeur de la source en fonction des typologies se valide bien par les concentrations en Y (Figure 12), qui est un élément essentiellement contrôlé par le grenat. On passe donc d'une source profonde associée à la typologie FI avec de faibles concentrations en Y dans la roche totale (puisque la cristallisation du grenat dans la source va retenir Y), jusqu'à une source plus superficielle avec des teneurs en Y plus élevées dans les échantillons de roche appartenant à la typologie FIII.

Il est intéressant de noter que pendant une même période de temps, entre 2695 et 2705 Ma, on observe bien cette distinction entre la mise en place de plutons à dominante FIII au sud et FI au nord-est.

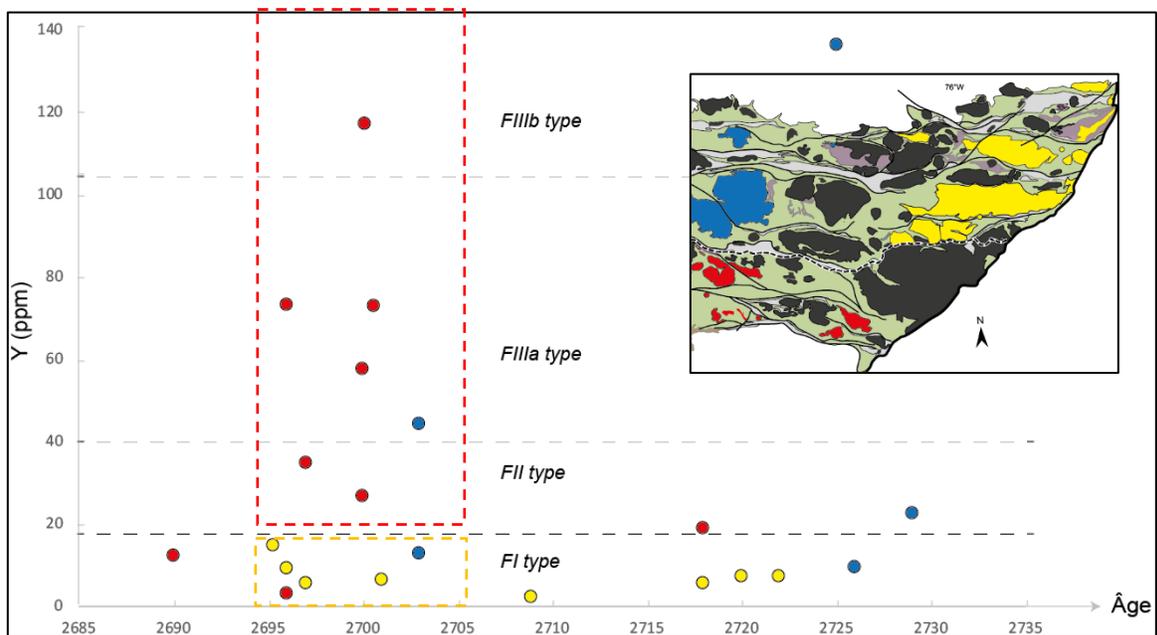


Figure 12 : Teneurs en Y des intrusions en fonction de leur âge.

## 2.2 Pressions de cristallisation

La description de la méthode de Yang (2017) et ses aspects critiques ont déjà été exposés dans le cadre du projet CONSOREM 2017-03 (M. Gigoux), dans lequel la méthode avait été testée pour la première fois pour les granitoïdes du territoire de la Baie-James.

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. Voici ci-dessous quelques rappels de cette méthodologie :

### *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 et 2015), mais aussi d'après des travaux expérimentaux (Rollinson, 1993).

$$P = -0.2426*(Qtz)^3 + 26.392*(Qtz)^2 - 980.74*(Qtz) + 12563$$

$$P = 0.2426*(Ab + Or)^3 - 46.397*(Ab + Or)^2 + 2981.3*(Ab + Or) - 64224$$

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.

Lors de sa première utilisation au Québec (projet CONSOREM 2017-03, M. Gigoux), certaines limites dans l'utilisation de la méthode ont pu être ainsi discutées dans le cadre des tests de calibration et de vérification des équations de Yang.

### *Rappel des limites concrètes de la méthode*

L'étude de Yang (2017) montre 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<sub>2</sub> 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 (> 3 000 MPa). Ces limites permettent ainsi de rester dans un contexte géologique cohérent.

L'auteur précise bien que d'autres tests seraient à effectuer afin de mieux contraindre la méthode sur plusieurs granitoïdes naturels. Il suggère plus de tests expérimentaux également afin de mieux comprendre les effets du fluor et du CO<sub>2</sub> par exemple, sur le système. L'influence des variations des concentrations en CaO, FeO et MgO sur le calcul des pressions de cristallisation est de la même façon à mieux définir.

En effet, il a été vérifié à la Baie-James et en Abitibi que les teneurs en CaO des granitoïdes peu évolués ont une influence sur les pressions de cristallisation, avec des pressions surestimées dans le cas des diorites par exemple. C'est l'une des raisons pour lesquelles les équations de Yang ne sont valables que pour les plutons évolués non altérés, ayant des teneurs en CaO généralement bien inférieures à 4% (tonalite, granodiorite, granite), sauf exception.

L'estimation des erreurs sur les calculs de pressions via la méthode de Yang (2017) est encore peu contrainte. Pour la méthode du géobaromètre Al-hornblende (Hammarstrom et Zen, 1986), il existe, d'après la littérature, une erreur d'environ  $\pm 3$  kbar sur les calculs de pressions, ce qui est assez significatif.

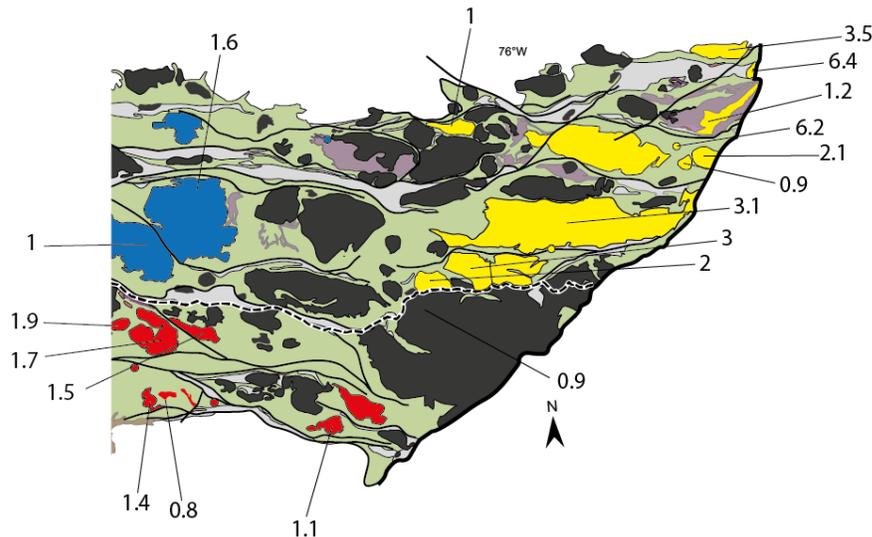
#### 2.2.1 Application en Abitibi

Dans le cadre de ce projet, la méthode a été utilisée sur différents plutons de type TTG syn-volcaniques et syn-tectoniques en Abitibi. Les résultats (en kbar) sont reportés sur la Figure 13. Trois approches ont été utilisées pour le calcul des pressions : 1) sur plusieurs échantillons de même nature lithologique d'un même pluton permettant ainsi de calculer

une incertitude (écart type standard) sur la pression moyenne obtenue ( $n = 8$ ); 2) à partir de l'échantillon lithogéochimique correspondant à l'échantillon de géochronologie ( $n = 6$ ) et 3) si aucune lithogéochimie de l'échantillon de géochronologique, les échantillons les plus proches de la datation ont été considérés ( $n = 5$ ). L'approche la plus rigoureuse est évidemment celle d'avoir la lithogéochimie correspondant à l'échantillon de géochronologie, ce qui permet alors de faire la correspondance directe entre la pression de cristallisation obtenue et l'âge de cristallisation du pluton. L'avantage est aussi que l'échantillon prélevé pour la datation d'une intrusion est celui considéré comme étant le moins altéré sur le terrain.

La méthode ne peut s'appliquer aux sanukitoïdes de par leur chimie particulière, très souvent alcaline, à la fin de l'Archéen. En effet, le fait de ramener à 100% les normes CIPW du quartz, de l'albite et de l'orthose, rend les pressions calculées fortement dépendantes des teneurs en sodium et potassium de la roche. Les teneurs en Na et K sont dépendantes de l'altération et/ou de la nature du pluton. L'identification de l'intensité de l'hydrothermalisme et de l'alcalinité des plutons est primordiale à l'utilisation de la méthode de Yang. Il est donc indispensable de travailler sur des échantillons les moins altérés et de s'affranchir des plutons les plus alcalins.

Les échantillons de lithogéochimie des plutons TTG utilisés pour le calcul des pressions ont été sélectionnés à partir du *box-plot* d'altération de Large *et al.* (2001) modifié par le CONSOREM en 2012 et disponible dans LithoModeleur. Il serait très délicat de passer par la méthode de modélisation des précurseurs étant donné l'incertitude existante sur les teneurs en Na et K modélisées (projet CONSOREM 2008-07, S. Trépanier). La modélisation fonctionne très bien pour le quartz mais la norme CIPW du quartz recalculée à 100% est dépendante des teneurs en Na et K. La modélisation ajouterait donc une incertitude supplémentaire au calcul de pressions, qui ne serait pas quantifiable.



**Figure 13** : Distribution des pressions de cristallisation en kbar calculées à partir de la méthode de Yang (2017)

Un total de 14 plutons datés ont été considérés pour cette étude puisqu'ils sont compatibles avec la méthode de Yang (2017). La distribution des pressions en fonction de l'âge des plutons (Figure 14A) montre des pressions faibles < 2 kbar entre 2730 et 2715 Ma, puis des pressions plus élevées post 2700 Ma. En fonction de la typologie des intrusions, il est possible de distinguer 3 familles de plutons (Figure 14B) : 1) ceux qui vont être associés aux types FIII et FII avec des plutons de faibles profondeurs de cristallisation associés à une source peu profonde du magma (p. ex. Flavrian, Bourlamaque); 2) ceux qui vont être associés au type FI avec des plutons de faibles pressions de cristallisation associés à une source profonde du magma (p. ex. Chibougamau); et 3) ceux qui vont être associés au type FI avec des plutons de plus fortes pressions de cristallisation associés à une source profonde du magma (p. ex. Barlow, Muscocho). Une différence de profondeur de cristallisation dans le temps au nord-est de l'Abitibi pour les plutons FI, avant et après 2705 Ma a été notée.

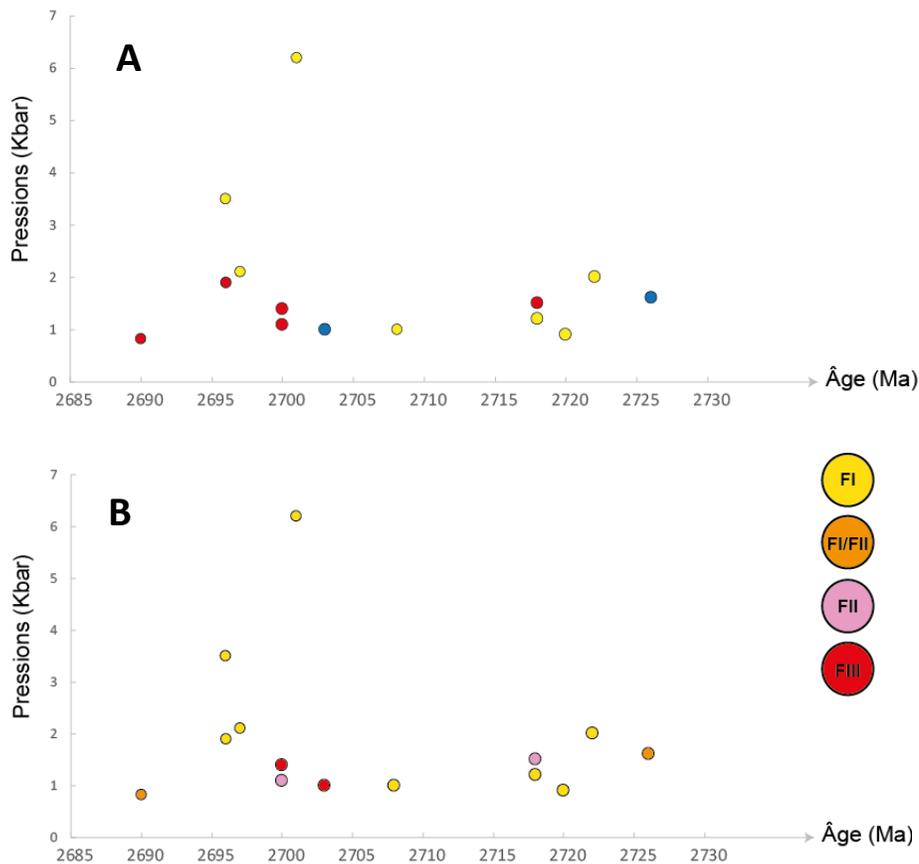


Figure 14 : Distribution des pressions en fonction de l'âge des plutons. A : en fonction de leur localisation géographique; B : en fonction de leur typologie.

## 2.2.2 Plutons syn-volcaniques et plutons syn-tectoniques

Il est important de définir les critères permettant réellement de discriminer les plutons syn-volcaniques. Rigoureusement parlant, un pluton est dit syn-volcanique s'il est comagmatique avec les rhyolites encaissantes. Pour cela, il est nécessaire que les rhyolites soient précisément datées, ce qui n'est pas toujours le cas. Une bonne partie de l'attribution syn-volcanique des plutons en Abitibi a été effectuée sur la base de critères géochimiques. Sur un ensemble de 30-35 datations de plutons TTG, seuls quelques-uns se sont avérés rigoureusement syn-volcaniques (p. ex. Mooshla, Fabie, Powell). Concernant le pluton de Flavrian, les rhyolites datées au pourtour sont plus jeunes que le pluton daté à 2700 Ma. La base de la séquence volcanique n'a pas été datée. Tout comme le pluton de Chibougamau, aucune rhyolite du même âge n'a été datée à ce jour. Cependant, nous pouvons repartir de la discrimination syn-volcanique/syn-tectonique connue à ce jour pour les plutons étudiés.

Il est important de noter que le pluton syn-tectonique de Barlow a été récemment interprété comme pouvant appartenir à la famille des SNK (Mathieu et Racicot, 2019). Il est donc prudent de rester critique sur les pressions obtenues pour ce pluton, du fait de sa chimie particulière. La pression moyenne obtenue est de 3.5 kbar, mais l'écart type est élevé soit  $\pm 2,7$ . Le calcul a été effectué à partir de 4 échantillons de roche (SIGÉOM) et des minéraux normatifs directement calculés par Racicot (1979) pour 6 échantillons.

Globalement il semble que les plutons syn-volcaniques soient associés à des pressions de cristallisation plus faibles ( $< 2$  kbar soit  $< 8$  km) que les plutons dit syn-tectoniques (Figure 15).

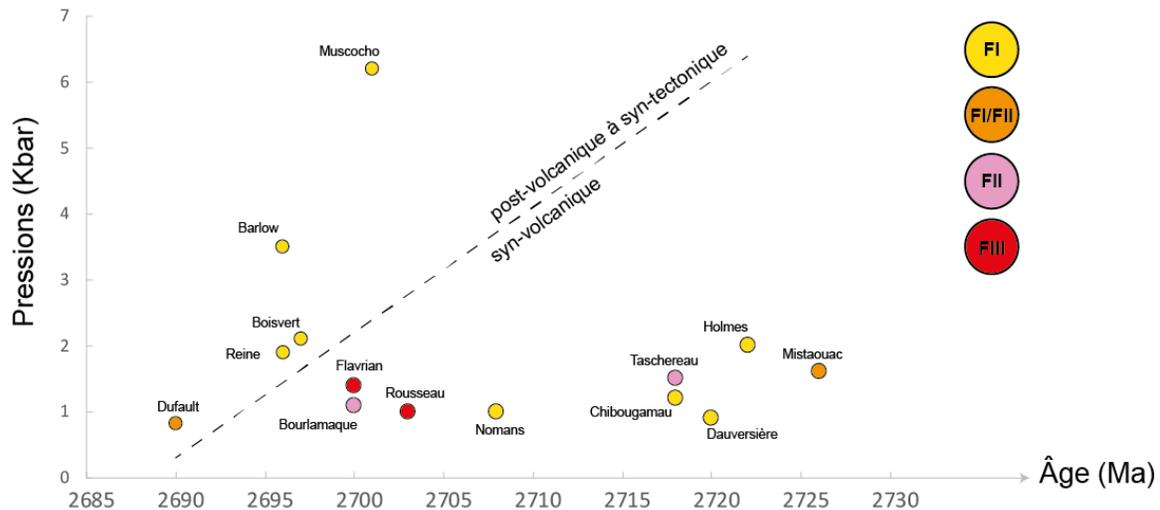


Figure 15 : Distinction des plutons syn-volcaniques et syn-tectoniques en Abitibi en fonction des pressions de cristallisation et des âges de cristallisation.

## 2.3 Réflexions et discussion

### À propos des TTG

D'après Franklin (2018), 72 % des intrusions qui sont associées spatialement aux SMV sont des TTG syn-volcaniques. Les travaux de Gaboury et Pearson (2008) en Abitibi et les travaux de Hollis *et al.* (2017 b, 2019) en Australie (craton Yilgarn) ont démontré que les rhyolites FIII étaient celles qui étaient les plus riches en HFSE. En Abitibi, ce sont celles qui vont être associées aux plus gros camps miniers de SMV, Noranda et Matagami. En Australie, Hollis *et al.* (2017 b, 2019), mettent en évidence que les granites les plus riches en HFSE sont spatialement liés aux SMV sur le craton Yilgarn.

Il est possible d'évaluer l'enrichissement en HFSE des plutons TTG en Abitibi, avec un diagramme binaire créé à cet effet et mettant en relation Nb et Y (Figure 16). On observe clairement que les plutons les plus riches en éléments incompatibles correspondent au type FIII avec les plutons de Flavrian, Fabie, Powell et le granophyre du Complexe Bell. Ce sont toutes des intrusions associées spatialement aux plus gros camps de SMV d'Abitibi, tout comme les rhyolites FIII. Les intrusions de type FII ont des compositions intermédiaires (p. ex. Bourlamaque) puis les types FI sont les plus appauvris en HFSE.

Un nouveau diagramme ternaire de fertilité est suggéré à partir de trois critères discriminants utilisés jusqu'ici : 1) anomalie en Eu, 2) La/Yb et 3) Nb (Figure 17). Ce diagramme permet de distinguer les différentes typologies. Les teneurs en Nb (ppm) les plus élevées vont permettre de distinguer les types FIIIb (p. ex. Pluton de Powell et granophyre Bell).

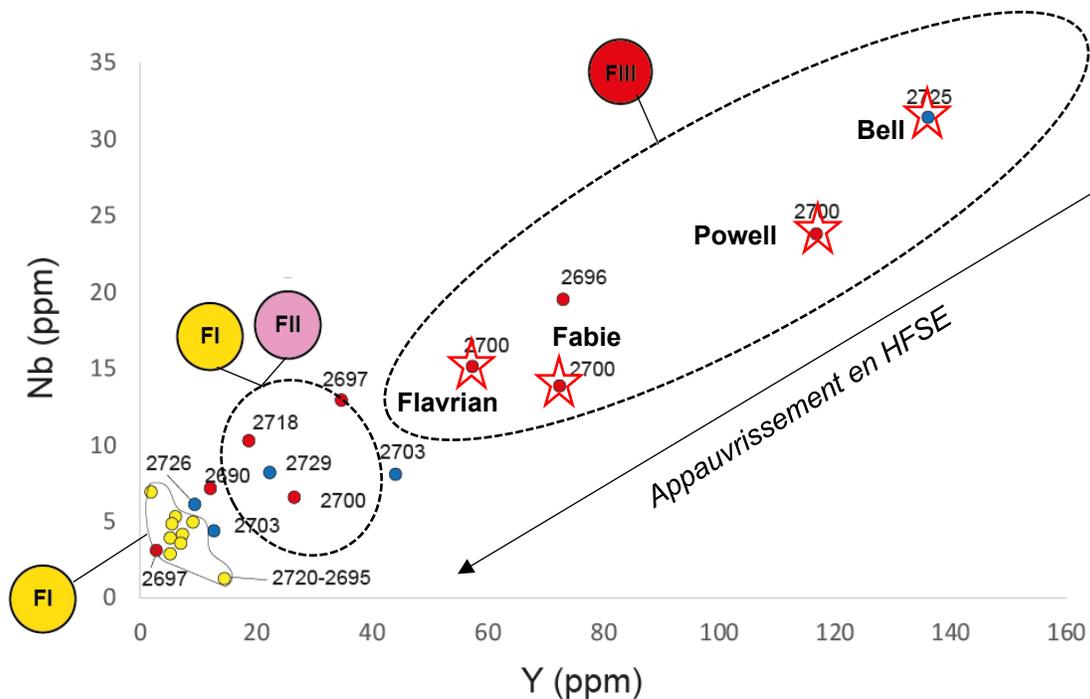


Figure 16 : Diagramme binaire d'éléments traces incompatibles, Nb en fonction de Y (ppm), en fonction des typologies et des âges des intrusions.

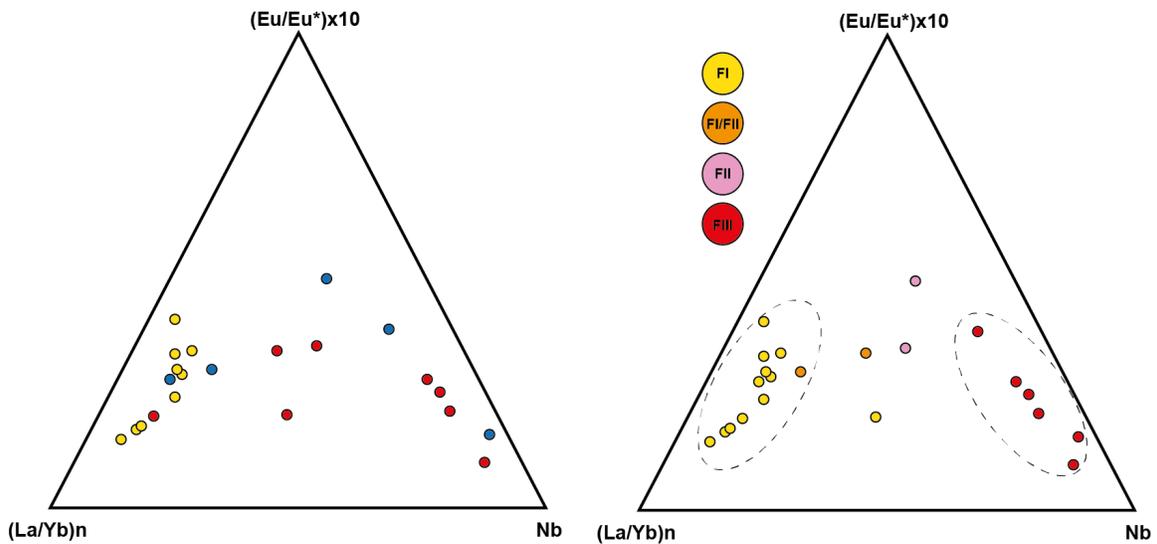


Figure 17 : Nouveau diagramme ternaire considérant trois critères les plus discriminants pour distinguer les typologies FI et FIII.

#### En résumé :

La typologie FI va être associée à un contexte de croûte épaisse, un équivalent d'arc magmatique, à une source profonde du magma et à des profondeurs de cristallisation qui vont varier dans le temps. Ce sont des intrusions qui vont être favorables à des minéralisations épithermales et/ou porphyriques lorsqu'elles vont être associées à des pressions faibles de cristallisation (p. ex. Chibougamau).

La typologie FIII va être associée à un contexte de croûte amincie, pouvant correspondre à un environnement d'arrière-arc magmatique, à une source peu profonde du magma et à des profondeurs de cristallisation faible (< 8 km). Ce sont des intrusions qui vont être favorables à des minéralisations de type SMV.

#### À propos des SNK :

Les intrusions sanukitoïdes sont de petits stocks généralement tardi-orogéniques qui vont se mettre en place après l'épisode magmatique TTG. En Abitibi, ce sont des magmas qui se mettent en place entre 2685 Ma et 2670 Ma, d'après la synthèse géochronologique réalisée par Goutier (*inédit*, 2012); Figure 18). La complexité chimique de ces magmas, issus d'un manteau métasomatisé très hétérogène avec plus ou moins d'assimilation crustale, et leur relation aux failles transcrustales, rend particulièrement difficile la classification de ces intrusions. Néanmoins, il est possible de distinguer plusieurs signatures en Abitibi. Cette distinction a été possible grâce aux diagrammes binaires d'éléments traces publiés dans les travaux de Laurent *et al.* (2014).

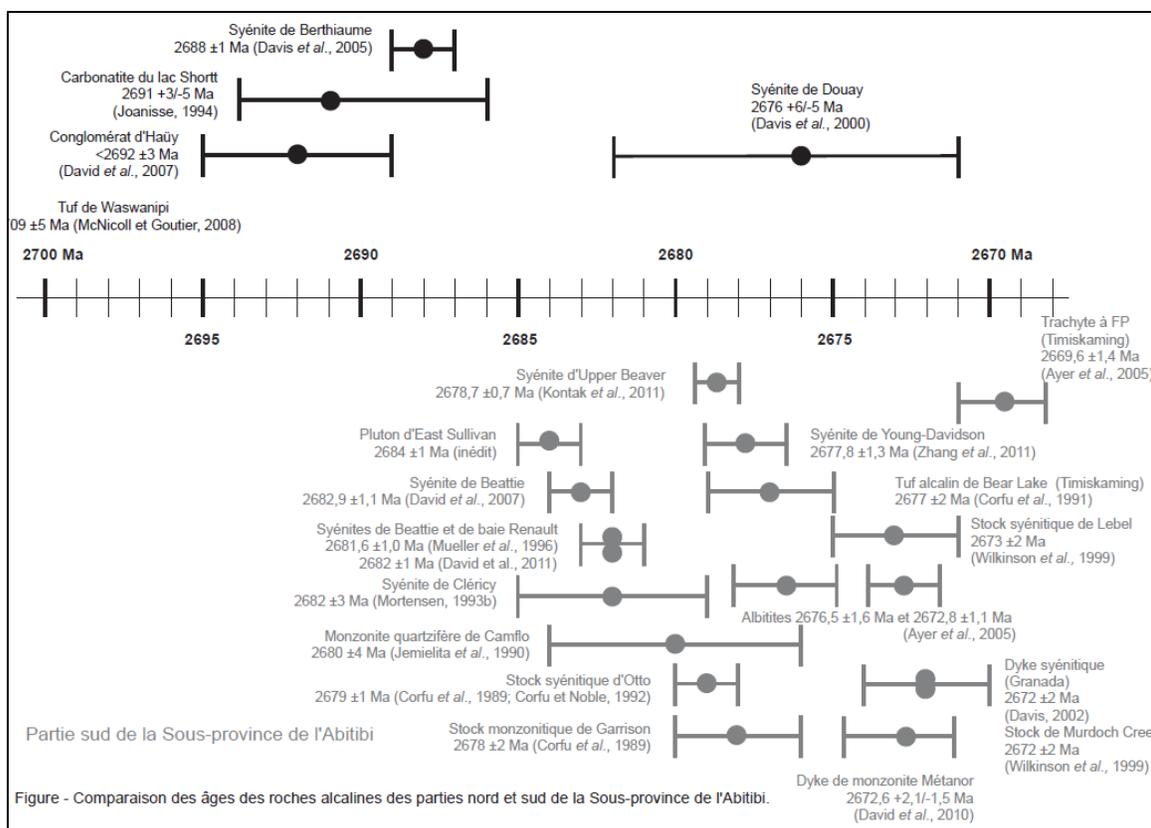


Figure 18 : Synthèse géochronologique des intrusions alcalines (certaines appartenant à la famille des SNK) en Abitibi à l'Archéen (Goutier, *inédit* 2012).

Les signatures de six intrusions interprétées comme appartenant à la famille des SNK sont visibles sur la Figure 19. Les intrusions de Beattie, East-Sullivan et Granada sont particulièrement riches en HFSE et se superposent au champ « Closepet-type » de Laurent *et al.* (2014). Par opposition, les signatures de la monzodiorite de Malartic, de la syénite de Dolodau et de Bachelor sont appauvries en HFSE. Les intrusions de Malartic et Bachelor montrent de nombreuses similitudes de compositions chimiques, compatibles avec la définition des SNK *sensu stricto*.

La signature des intrusions de Kirkland Lake indique qu'elles sont également pauvres en HFSE et riches en Ni, mais ne peuvent pas être directement comparées avec les signatures précédentes, car elles sont beaucoup moins différenciées.

Il existe donc plusieurs types de SNK associés spatialement à des minéralisations aurifères en Abitibi, mais il est difficile à ce stade d'en tirer des conclusions significatives pour l'exploration. Il est compliqué d'y voir une relation spatiale, géochronologique, chimique avec la présence de minéralisations. Néanmoins, la présence des intrusions riches en HFSE est bien marquée au sud de l'Abitibi, tout comme la présence des TTG de type FIII les plus riches en HFSE qui sont dominants au sud. Il semblerait donc y avoir, au sud de la sous-province, une ou plusieurs sources riches en HFSE pour les épisodes magmatiques successifs TTG puis SNK au cours de l'Archéen. Il existe encore des lacunes de cartographie au nord de la sous-province, associées à un biais

d'échantillonnage et de connaissance de ce type d'intrusion. Il existe un potentiel métallogénique d'intérêt avec la présence de nombreux petits stocks alcalins à calco-alcalins au nord associés à de grands bassins sédimentaires encore mal connus.

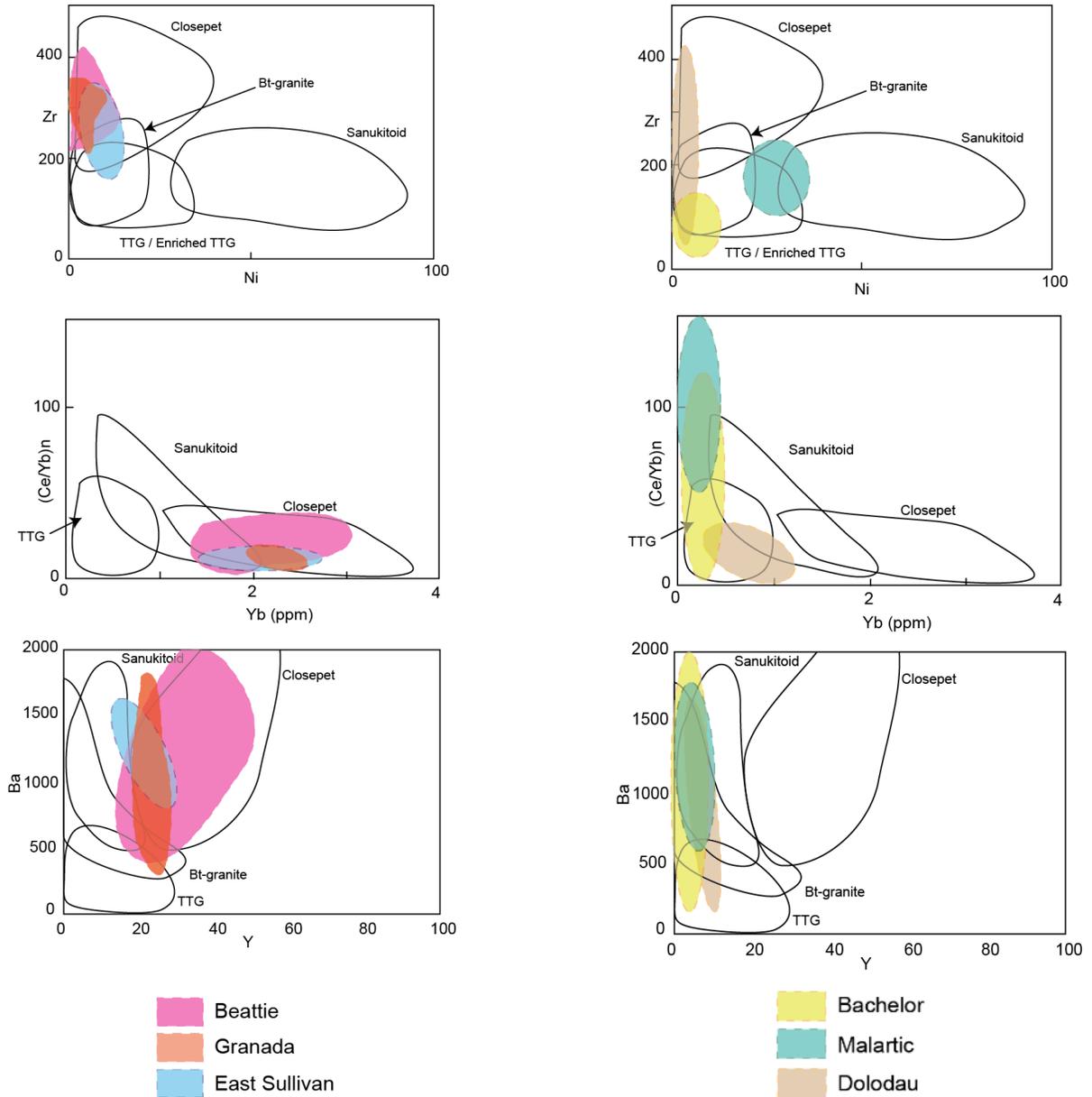


Figure 19 : Diagrammes binaires d'éléments traces et signatures géochimiques des intrusions de type SNK en Abitibi. Données issues de Bigot et Jébrak (2015); Bigot, F. (*inédit*); Fayol et al. (2017); Helt (2012); SIGÉOM.

### 3. APPLICATION À LA BAIE-JAMES (phase 2)

#### 3.1 Retour sur le diagramme ternaire de Laurent

Utilisé dans les deux phases du projet, il est important de bien comprendre ce diagramme et d'en améliorer sa compréhension pour son application en exploration.

Il s'agit d'un diagramme constitué de trois pôles (Figure 20) : 1)  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ , qui caractérise le degré de différenciation et l'évolution du magma; 2)  $A/\text{CNK}$ , qui caractérise le degré d'aluminosité du magma et 3)  $2^*\text{FMSB}$  pour indiquer le caractère mafique et plus ou moins enrichi en éléments lithophiles à grand rayon ionique (LILE; Sr et Ba).

C'est un diagramme qui est différent de celui de Middlemost en termes de classification puisqu'il va prendre en compte plus d'information sur le caractère du magma. Il est en réalité complémentaire à celui-ci, et va permettre d'établir une classification en termes de famille ou de suite d'intrusion. Il permet également de visualiser une évolution intéressante qui est celle de la continuité dans le temps à l'Archéen des suites TTG jusqu'aux suites SNK. Ce sont des suites intrusives qui vont se succéder dans le temps avec l'évolution notamment vers un manteau métasomaté et beaucoup plus hétérogène à la fin de l'Archéen. Cette succession est bien documentée aujourd'hui pour tous les cratons du monde comme l'illustre la Figure 20.

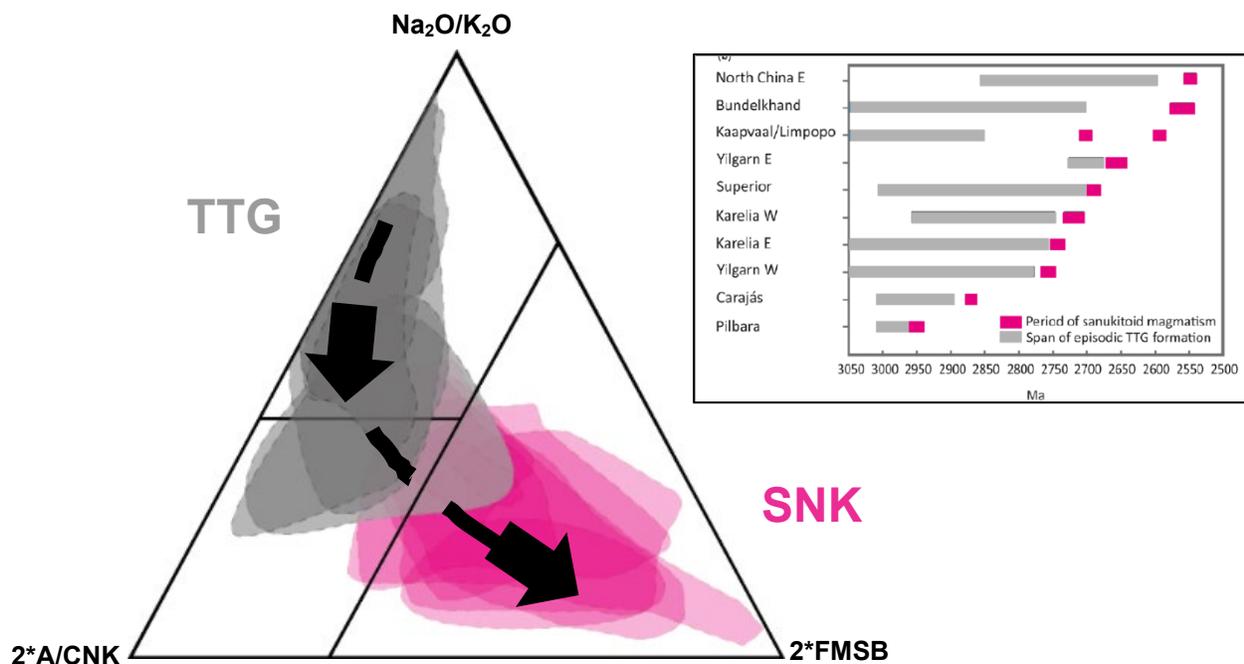


Figure 20 : Distribution des pressions de cristallisation en kbar calculées à partir de la méthode de Yang (2017).

La base de données GEOROC (<https://georoc.eu/>), utilisée dans les projets CONSOREM 2008-07 et 2012-05 (S. Trépanier) a été importée dans ce diagramme afin de voir la distribution des échantillons de roches fraîches alcalines et sub-alcalines récentes. Il en ressort que la majorité des roches alcalines actuelles (en rose, Figure 21A) se positionnent dans le champ des SNK archéens. Cependant, il existe également quelques échantillons de roches sub-alcalines. Il ne faut pas faire d'amalgame ici entre affinité magmatique et famille intrusive (p. ex. alcalin vs SNK). En effet, il existe des SNK calco-alcalins (HKCA; Moyen, 2019) qui ne sont pas dénués d'intérêt pour un potentiel métallogénique significatif.

Lorsqu'on sélectionne uniquement les échantillons rattachés à un contexte de marge convergente (Figure 21B), on aperçoit une distribution particulière des échantillons les plus riches en  $K_2O$ . Un champ pointillé rouge a ainsi été rajouté dans le diagramme pour identifier ces chimies ultra-K particulières.

À la Baie-James, la classification des roches en termes de famille puis de type de roches a été effectuée à partir de ce diagramme de Laurent *et al.* (2014), modifié.

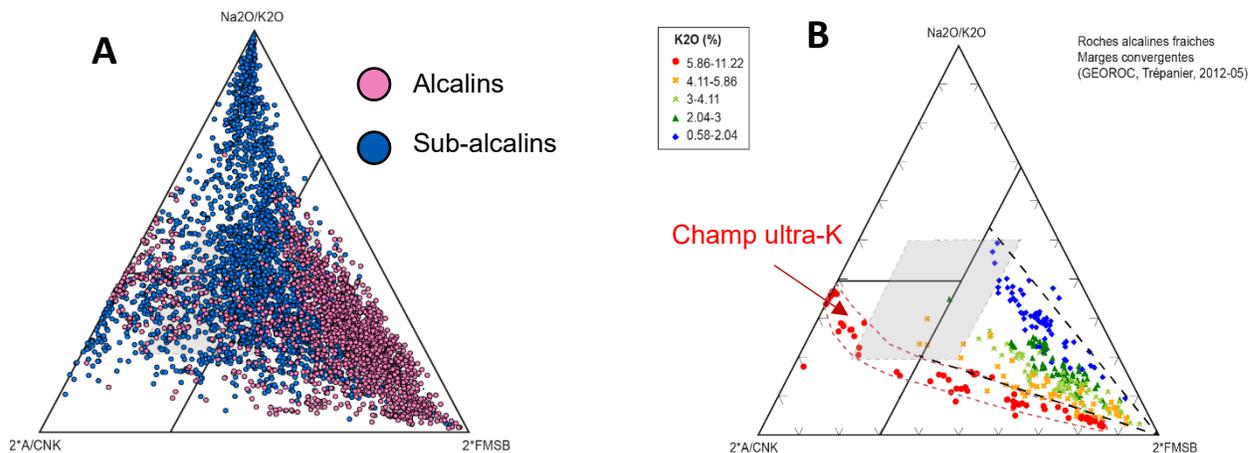


Figure 21 : A: Distribution des échantillons de roche de la base de données GEOROC (<https://georoc.eu/>; n=5 810) dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014); B : sélection des échantillons de contexte de marge convergente seulement en fonction de leur teneur en  $K_2O$  (%).

### 3.2 Stratégie de classification des intrusions à la Baie-James

Avant de s'attaquer directement au territoire de la Baie-James, dont la classification des intrusions est encore peu documentée dans le détail, surtout pour les SNK, il a été question de s'intéresser aux travaux réalisés en Ontario. L'équipe de Stern *et al.* (1989) sont les premiers à avoir identifié des SNK à l'Archéen dans la Sous-province de Wabigoon. Ce sont des compositions qui doivent être considérées comme référence et qui pourront être comparées avec ce qui se retrouve en termes de chimie, à la Baie-James, pour le même type de roche. L'idée derrière cette démarche est de s'attacher aux correspondances géologiques et géochronologiques qui sont suggérées entre les

différentes sous-provinces de part et d'autre de la frontière, et notamment entre Wabigoon et La Grande (Percival *et al.*, 2012).

La première suite SNK identifiée par Stern *et al.* (1989) est celle de Roaring River Complex (diorite-monzodiorite-granodiorite, 2623 Ma) dans la sous-province à dominante plutonique de Wabigoon. Ces travaux ont été repris par Stevenson *et al.* (1999) qui ont caractérisé 8 nouvelles suites SNK dans la Sous-province de Wabigoon (Figure 22). Elles sont décrites comme appartenant à des suites de type diorite-monzonite-granodiorite-syénite riche en LILE. La distribution des échantillons de ces suites SNK tombe dans le champ SNK archéen du diagramme de Laurent *et al.* (2014). C'est donc un diagramme qui peut être exporté à la Baie-James pour retracer les SNK potentiels du territoire, sur la base de ces observations.

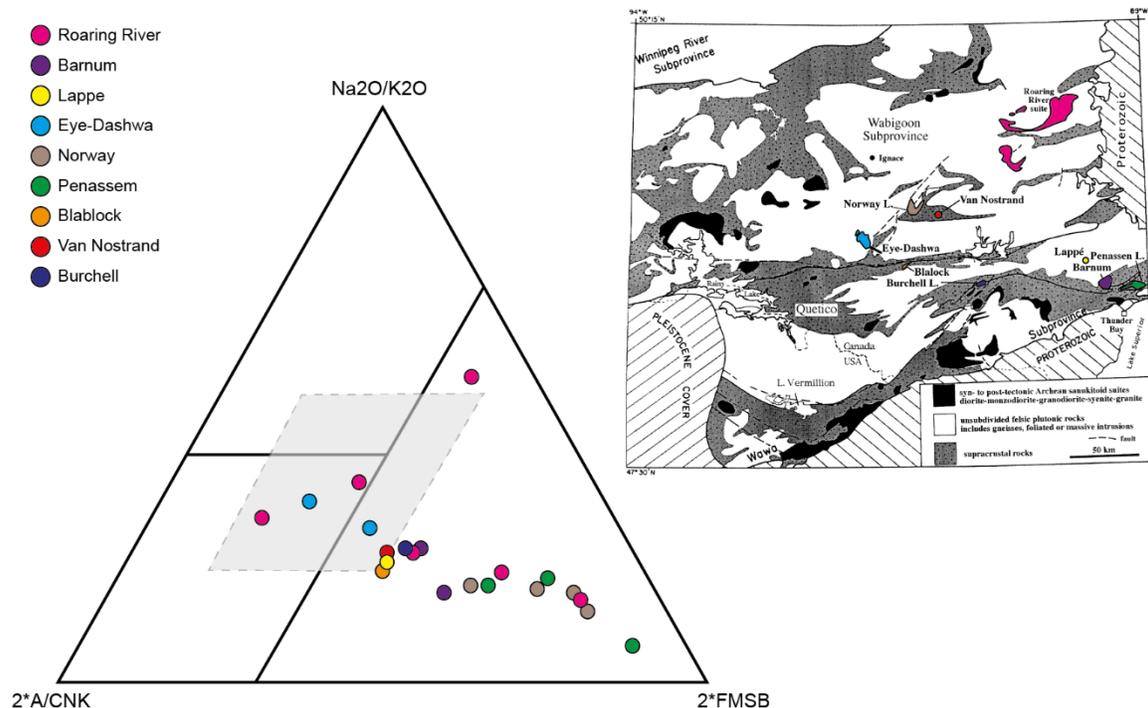


Figure 22 : Distribution géochimique des échantillons de roche de type SNK dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014) d'après les données de Stevenson *et al.* (1999).

Pour ce faire, toute la base de données des échantillons de roches du SIGÉOM a été considérée en réalisant un premier tri des roches ignées de types I1-I2-I3. Ensuite, un tri par perte au feu (PAF) < 2 a été considéré et couplé aux deux *box-plots* d'altération disponibles dans LithoModeleur (Large *et al.*, 2001 modifié par CONSOREM 2012; Hugues, 1973 modifié par CONSOREM 2012). L'objectif est, à partir de cette grande base de données, de réaliser un premier tri homogène et relativement rapide afin d'en extraire les échantillons les moins altérés pour les reclasser ensuite selon Middlemost (1985). La nouvelle classification via Middlemost va permettre d'attribuer un nom de roche en fonction de la chimie de l'échantillon et de s'affranchir des noms de terrain qui sont souvent attribués par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec

(MRNF) dans la base de données du SIGÉOM. Il s'agit évidemment de rester critique sur le caractère « frais » ou « moins altéré » de ces échantillons, la Baie-James étant un territoire à haut grade métamorphique, avec la présence de niveaux crustaux profonds. Il a été impossible, dans le temps imparti de ce projet, de vérifier le caractère relativement « frais » des échantillons sélectionnés via leurs assemblages minéralogiques respectifs.

La distribution des échantillons les moins altérés dans le diagramme de Laurent et al. (2014) permet de bien discriminer les suites de type monzodiorite-monzonite-syénite à l'échelle du Québec (Figure 23A).

Le second tri a consisté à sélectionner les échantillons de roches des feuilletts 32J à 33H à la Baie-James (Figure 23B). On note la distribution de la majorité des granites alcalins (en rouge) et de quelques syénites (en rose) dans le domaine des granites à deux micas, qui viennent se superposer au domaine ultra-K en pointillé rouge (Figure 23B). Ces échantillons correspondent effectivement aux échantillons les plus riches en  $K_2O$  et ce sont ceux qui vont être les plus différenciés (Figure 23D).

La répartition spatiale de ces échantillons est illustrée sur la Figure 24. Ce sont des échantillons qui peuvent avoir un intérêt pour l'exploration pour l'or mais aussi pour d'autres types de substances, notamment les substances critiques et/ou stratégiques comme les ETR, le lithium, le tungstène, le niobium ou le fluor.

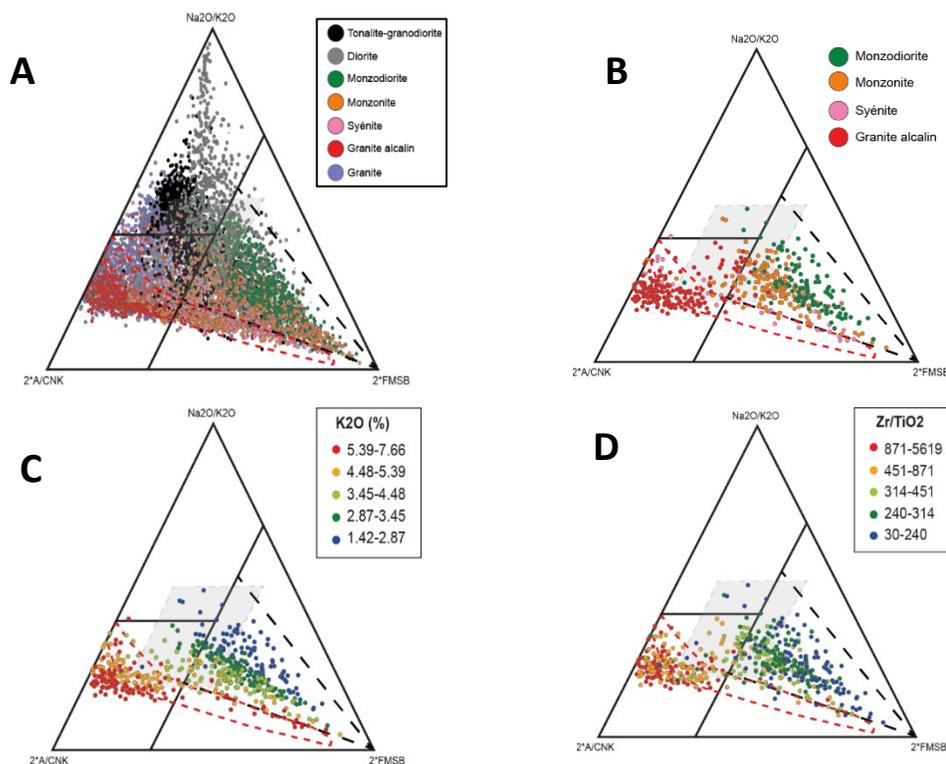
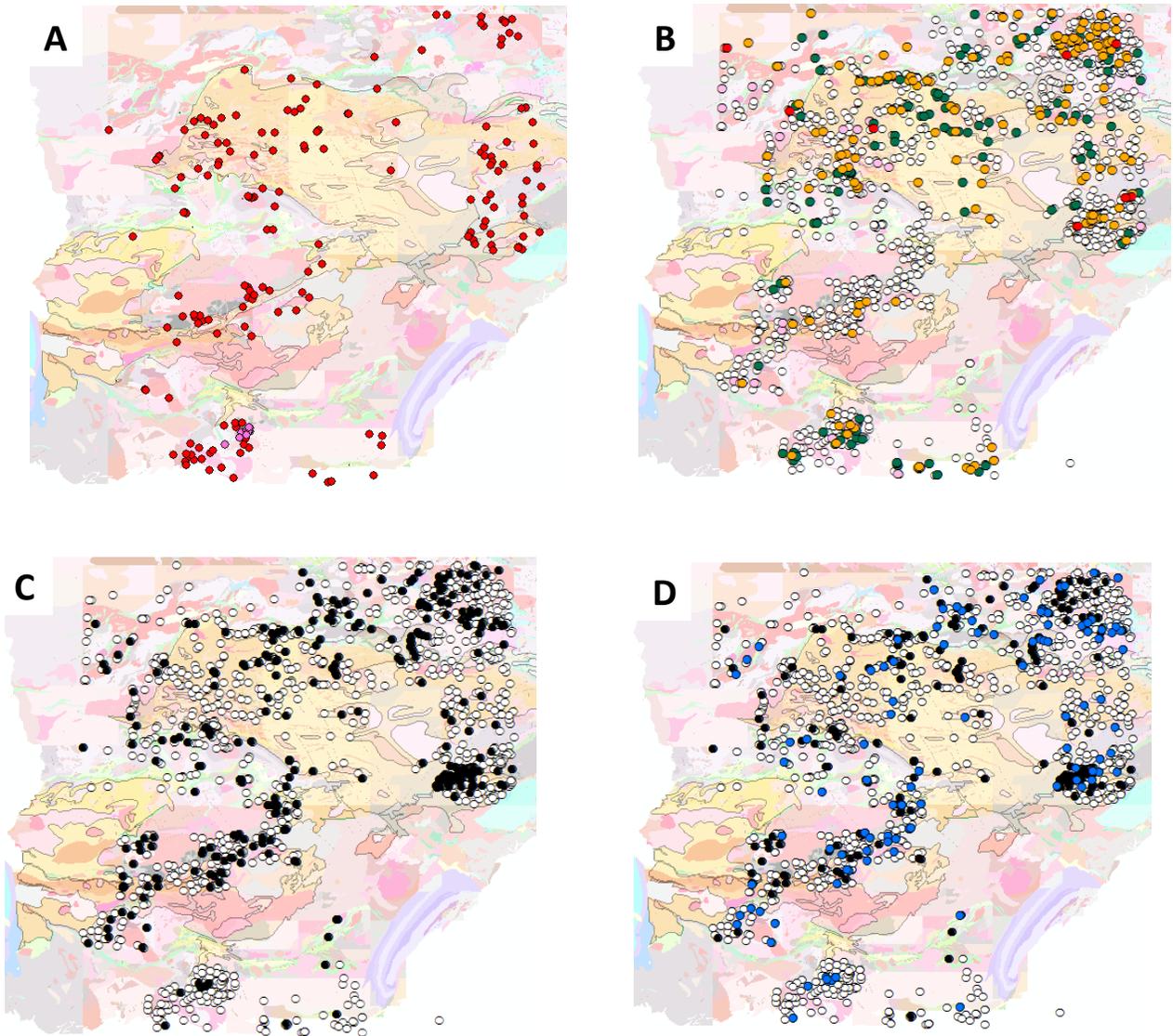


Figure 23 : A : Distribution géochimique des échantillons ignés les moins altérés (n = 7017, SIGÉOM) en fonction de leur classification lithologique (Middlemost, 1985 modifié par Lafrance, 2011); B : Sélection des échantillons des feuilletts 32J à 33H (n = 526); C : teneurs en  $K_2O$  (%) des échantillons sélectionnés; D : Degré de différenciation des échantillons via le rapport  $Zr/TiO_2$ .



**Figure 24** : Distribution spatiale des échantillons A : de granites alcalins et de syénites ultra-K; B : du champ SNK du diagramme de Laurent et al. (2014); C : des tonalites-granodiorites; D : du champ TTG du diagramme de Laurent et al. (2014) en bleu. Les échantillons blancs représentent la répartition de l'ensemble des échantillons ignés les moins altérés.

Il est intéressant de remarquer que l'ensemble des échantillons de syénites riches en K (en rose, Figure 24A) se localise dans le secteur de la syénite d'Amisquioumisca, dans la Sous-province d'Opatica. Cette syénite a été datée à 2686 Ma et de la fluorine y a été observée.

Ensuite, la distribution des échantillons se retrouvant dans le champ des SNK du diagramme de Laurent *et al.* (2014), est illustrée en Figure 24B. D'après la classification de Middlemost des échantillons les moins altérés, il y aurait très peu de syénite à la Baie-James, le territoire étant dominé par les monzonites-monzodiorites.

Les échantillons de tonalites-granodiorites sont localisés sur la Figure 24C, et ceux se retrouvant exclusivement dans le champ TTG du diagramme, en Figure 24D (en bleu). Il faut noter que les échantillons de granodiorites du champ des SNK sont généralement ceux qui sont les plus riches en Mg et qui peuvent tout aussi bien être stratégiques pour l'exploration.

### 3.3 Les intrusions minéralisées à la Baie-James

Dans le cadre de ce projet, les données lithogéochimiques de sept gîtes (LGS<sup>1</sup>, Cheechoo<sup>2</sup>, Ilto<sup>3</sup>, Mythril<sup>4</sup>, Héberto<sup>5</sup>, Tilly<sup>6</sup>, Ménarik<sup>7</sup>) et deux gisements (Éléonore<sup>8</sup> et Hammond Reef<sup>9</sup>) associés spatialement à des intrusions ont été compilées. Il est important de noter que le gisement d'Hammond Reef se localise dans la Sous-province de Wabigoon. C'est un gisement d'or disséminé et encaissé dans une granodiorite porphyrique localement bréchifiée (pluton de Marmion ~ 2.9 Ga; Backeberg *et al.*, 2018). Des minéralisations de type veines de Qz-Cb et or visible ont été décrites également. L'intrusion SNK Eye Dashwa (2.68 Ga) est présente à proximité du gisement, le long d'un cisaillement régional NE. Elle a donc été intégrée à la base de données pour l'ensemble de ces caractéristiques d'intérêt.

L'ensemble des données a été inséré dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014) et illustré en Figure 25. On aperçoit deux tendances : une première tendance sodique à alumineuse et une seconde ferro-magnésienne jusqu'à plus différenciée.

Tout d'abord, la première tendance correspond essentiellement aux échantillons appartenant à la famille des TTG avec une évolution linéaire pour les échantillons de LGS, Tilly, Marmion et Cheechoo (faciès porphyrique, en rose clair). Il est intéressant de souligner que LGS, Tilly et Marmion sont tous officiellement interprétés comme appartenant à la famille de gisements porphyriques (Mercier-Langevin *et al.*, 2014; Chapon, 2011; Backeberg *et al.*, 2018). Il existe une distribution des données plus chaotique pour la granodiorite non porphyrique de Cheechoo, des échantillons de Ilto et d'Héberto. À noter que Tilly et Ilto montrent des échantillons de type monzodiorite-monzonite sub-alkaline dans le champ des SNK du diagramme.

<sup>1</sup> Mercier-Langevin *et al.*, 2014; <sup>2</sup> Ressources Sirios; <sup>3</sup> Osisko; <sup>4</sup> Exploration Midland; <sup>5</sup> Blu, 2018; <sup>6</sup> SIGÉOM; <sup>7</sup> Hamel-Hébert et De Souza, *inédit*; <sup>8</sup> Fournier, 2017; <sup>9</sup> Backeberg *et al.*, 2018.

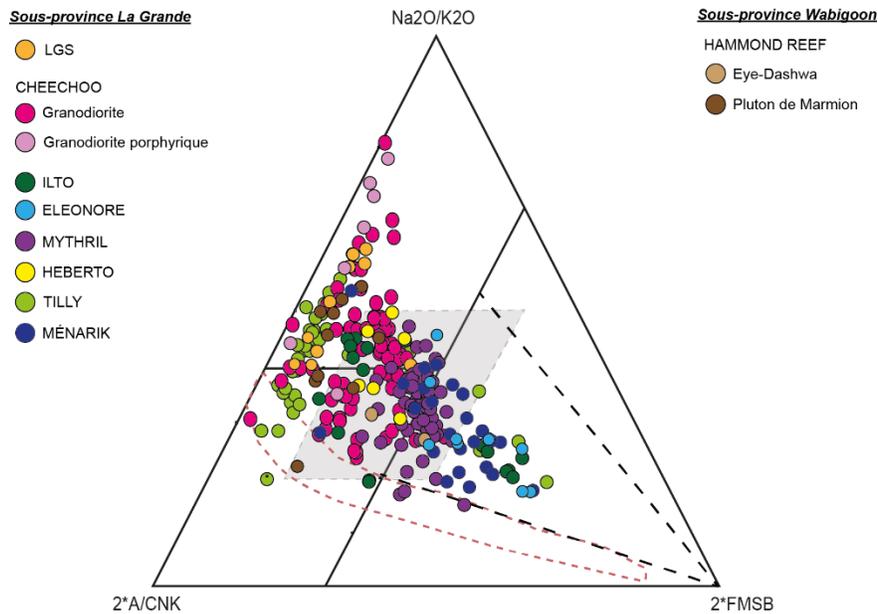


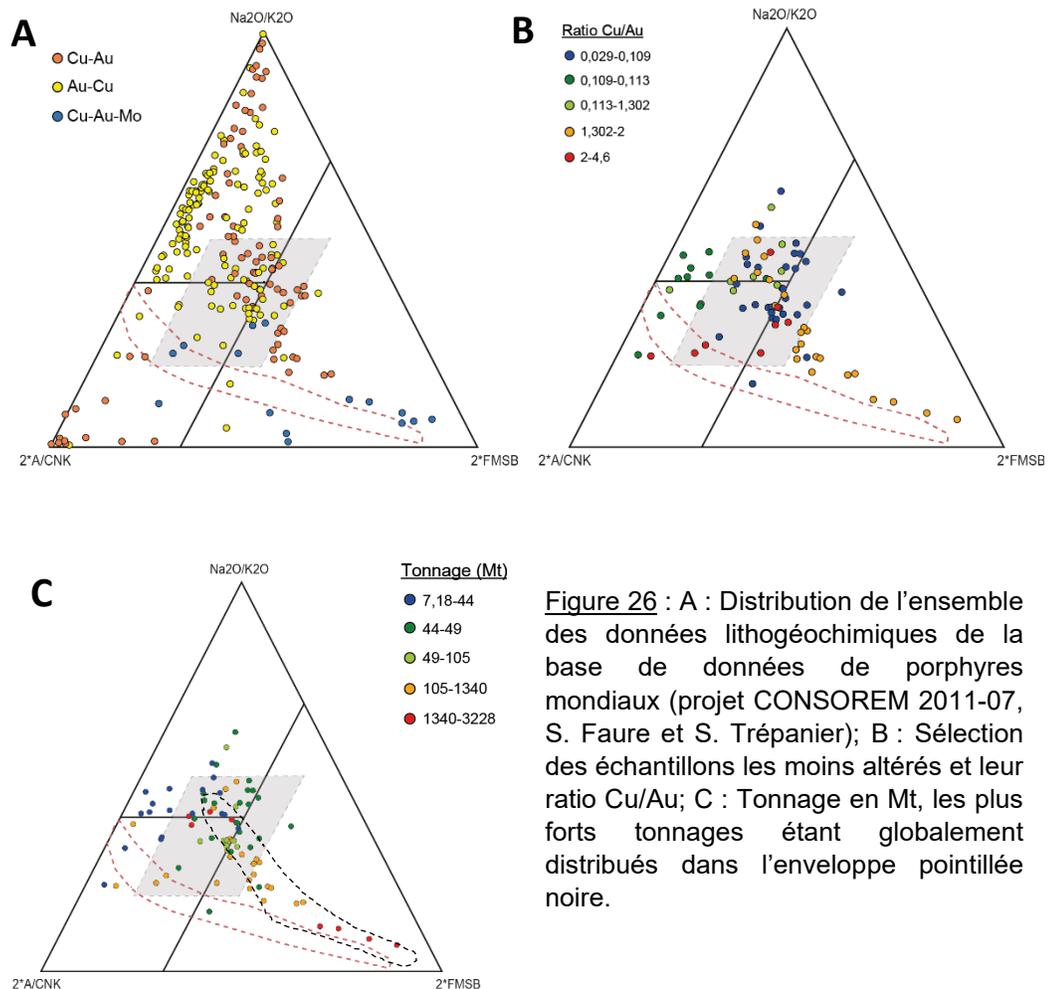
Figure 25 : Distribution des données lithogéochimiques dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014) des gîtes et gisements minéralisés à la Baie-James (Sous-province de La Grande). Un seul gisement aurifère est localisé dans la Sous-province de Wabigoon (Hammond Reef).

La deuxième grande tendance va correspondre à la distribution des échantillons des gîtes de Mythrill, Ménarrik et des échantillons de diorite et de tonalite du gisement d'Éléonore qui se retrouvent dans le domaine hybride à SNK du diagramme. D'après la classification de Middlemost, ils vont correspondre à des échantillons de monzodiorite, monzonite à quartz et granodiorite.

Dans le projet CONSOREM 2011-07 (S. Faure et S. Trépanier), les données lithogéochimiques du gisement Cu-Au de Troilus et du gîte Au-Cu de LGS ont été intégrées à une grande base de données de porphyres récents à Cu-Au mondiaux (4 465 données). Suite à ce projet, il est possible de tester le potentiel porphyrique d'un échantillon lithogéochimique d'une intrusion sub-alcaline en comparant sa composition à celles connues pour être associées à des gisements Cu-Au dans le monde, via la méthode des réseaux neuronaux. Ce test a été utilisé dans le cadre de ce projet pour déterminer des cibles potentiellement favorables. Cette base de données a donc fait l'objet d'un intérêt particulier et a été testée pour la première fois dans le diagramme de Laurent *et al.* (2014; Figure 26A). L'idée était de voir s'il était possible de faire ressortir des tendances en fonction du cortège métallique et de la chimie des échantillons. Il s'agit évidemment d'échantillons minéralisés et donc potentiellement altérés à fortement altérés. Une sélection des échantillons les moins altérés (*box-plot* d'altération) a été effectuée afin de visualiser la répartition des cortèges métalliques et des ratios Cu/Au (Figure 26B). Les trois tendances suivantes ressortent : 1) les échantillons globalement plus riches en Au sont dans le champ des TTG; 2) ceux plus riches en Cu ± Au ± Mo sont dans le champ

des SNK et 3) ceux dominés par Cu-Mo sont dans le champ des granites à biotite avec des compositions plus alumineuses. Un parallèle peut être fait avec les travaux de Azevedo (2015), Blevin *et al.* (1992) et Moyen (2014) qui ont travaillé à mettre en relation le degré d'oxydation du magma, la différenciation magmatique et les cortèges métalliques. On va retrouver les intrusions les plus mafiques et généralement oxydées dans le champ des SNK avec une dominante Cu et Au. Les intrusions TTG qui vont être plus ou moins hybrides et plus ou moins oxydées, seront plus riches en Au. Enfin, les intrusions les plus différenciées et très souvent réduites sont celles du champ des granites à biotite plus riches en Cu-Mo ± W.

Au regard des tonnages en Mt de ces gisements porphyriques récents, une tendance se dégage pour les plus gros gisements (Figure 26C). La distribution des échantillons de Mythril, Ménarik et Éléonore dans le diagramme (Figure 25) s'inscrit dans cette tendance des plus gros gisements. Il est à noter également que plus de 80% des échantillons de ces trois gîtes ont une chimie comparable aux porphyres récents Cu-Au mondiaux, via la méthode du potentiel porphyre développée dans le projet CONSOREM 2011-07.



**Figure 26** : A : Distribution de l'ensemble des données lithogéochimiques de la base de données de porphyres mondiaux (projet CONSOREM 2011-07, S. Faure et S. Trépanier); B : Sélection des échantillons les moins altérés et leur ratio Cu/Au; C : Tonnage en Mt, les plus forts tonnages étant globalement distribués dans l'enveloppe pointillée noire.

### 3.4 Cartographie et ciblage

À partir de la classification des échantillons plutoniques du SIGÉOM et des signatures des différentes intrusions minéralisées à la Baie-James, plusieurs ciblage ont été effectués par quatre méthodologies distinctes. Deux d'entre eux ont été réalisés à partir de la chimie des signatures SNK identifiées en Abitibi dans la première phase du projet soit type « Beattie » et type « Malartic ». Les deux autres ont été réalisés à partir de la signature de la récente découverte de Mythril (Cu-Au-Mo) et des travaux de Chariadia (2020) sur les caractéristiques géochimiques des porphyres Cu-Au récents. Les deux grandes familles TTG et SNK ont été travaillées et ciblées avec succès dans ce projet. Dans le détail, 11 cibles de type TTG et 10 cibles de type SNK (potentiels) ont été suggérées sur le territoire de la Baie-James. Le détail des différents ciblage est présenté ci-dessous :

#### *Premier ciblage*

La première méthode de ciblage est basée sur les diagrammes binaires d'éléments traces de Laurent *et al.* (2014), utilisés dans la phase 1, pour discriminer les signatures de Beattie et de Malartic en Abitibi.

Le premier ciblage consiste, à partir des échantillons du SIGÉOM du champ SNK, à identifier ceux qui avaient une signature comparable à celle de Beattie. Trois diagrammes binaires d'éléments traces ont été utilisés ainsi que le diagramme de fertilité Th/Nb vs Zr/Y réalisé dans le cadre du projet CONSOREM 2011-02 (B. Lafrance, Figure 27). Les échantillons qui vont ainsi coïncider dans tous les champs « Beattie » seront considérés comme cibles potentielles. Seulement trois échantillons de syénites alcalines ressortent dans le secteur d'Amisquioumisca. La syénite de Beattie datée à  $2682,9 \pm 1.1$  Ma a un âge relativement proche de celle d'Amisquioumisca ( $2686,7 \pm 4.7$  Ma).

#### *Deuxième ciblage*

Le second ciblage est basé sur la même méthodologie, à partir de deux diagrammes binaires (Ba vs Y et Ce/Yb vs Yb) et du diagramme de Pearce, utilisé dans le projet CONSOREM 2011-02 (B. Lafrance), mais cette fois-ci, pour identifier les signatures comparables à la monzodiorite de Malartic. Pour ce ciblage, les données géochimiques récentes de De Souza *et al.* (2023) ont été considérées pour la signature de Malartic. Quatre échantillons sub-alcalins ressortent comme cibles à la Baie-James (voir le fichier des cibles et la présentation de livraison pour les détails). Deux échantillons de monzonite à quartz sont ciblés dans le secteur du pluton de Chevrillon dans la Formation de conglomérat polygénique de Chebistuan. Un échantillon correspond à l'échantillon de géochronologie de la suite de Cadieux, daté à  $2699 \pm 5$  Ma. Le dernier échantillon est localisé dans le groupe de Yasinski du projet Sakami (Corporation Métaux Précieux).

#### *Troisième ciblage*

Ce ciblage consiste, à partir des échantillons du SIGÉOM du champ SNK, à identifier ceux qui ont une signature comparable à celle de la monzonite de Mythril. Les deux mêmes diagrammes binaires précédents ont été utilisés (Figure 28), couplés à la méthodologie du potentiel porphyrique (projet CONSOREM 2011-07, S. Faure). Plus de 90 % des échantillons (97 % de monzonites,  $n = 28$ ; 93 % de granodiorites,  $n = 40$ ) du gîte de Mythril (Cu-Au-Mo) répondent positivement au test de potentiel porphyre.

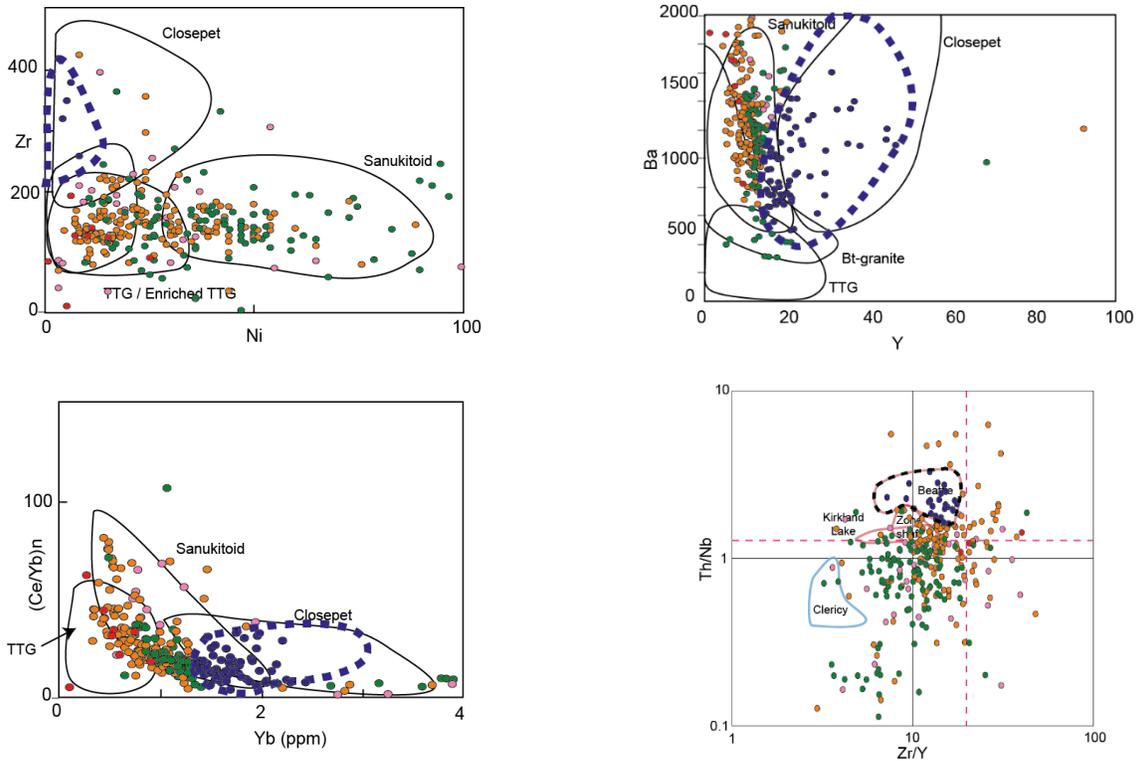


Figure 27 : Diagrammes binaires d'éléments traces issus des travaux de Laurent *et al.* (2014) et diagramme de fertilité d'après les travaux de Lafrance (projet CONSOREM 2011-02). La signature de Beattie est en bleu.

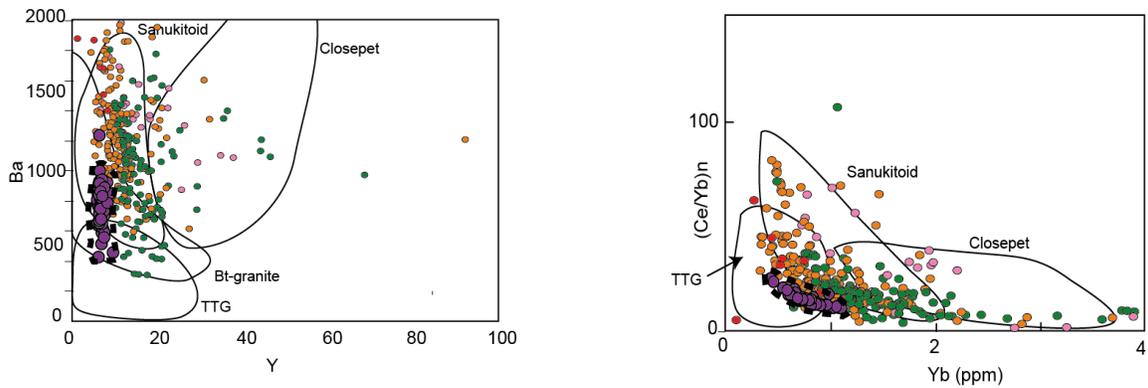


Figure 28 : Diagrammes binaires d'éléments traces issus des travaux de Laurent *et al.* (2014) et signature de Myhril en violet.

Trois échantillons ressortent de ce ciblage. Deux échantillons de monzonites sub-alkalines dans le secteur de la Suite de Janin et du pluton d'Uskawasis (secteur de la mine Éléonore) et un échantillon de monzodiorite alcaline dans la Formation de Keyano, au niveau des roches métasédimentaires et de niveaux conglomératiques reconnus (< 2710 Ma).

#### Quatrième ciblage

Le dernier ciblage concerne les échantillons SIGÉOM de type tonalite-granodiorite. Il est appliqué aux TTG pour cibler un potentiel porphyrique de type Cu-Au ±Mo. Pour ce faire un nouveau diagramme de fertilité a été réalisé (Figure 29), basé sur les rapports d'éléments traces Sr/Y et La/Yb ainsi que les travaux de Chiaradia et Caricchi (2017). Ces derniers ont démontré, par modélisation, que les plus gros porphyres à Cu-Au récents avaient des rapports Sr/Y qui étaient globalement compris entre 50 et 150. Ils démontrent que ce rapport est corrélé avec la profondeur de source du magma, tout comme le rapport La/Yb qui a été interprété de cette manière pour la classification des rhyolites puis des plutons dans la phase 1 de ce projet. Les travaux de Chiaradia, (2020) montrent également que les magmas alcalins sont plus riches en or que les magmas calco-alcalins.

Le champ pointillé rouge (Figure 29) permet ainsi de cibler les échantillons comparables à la chimie des plus gros porphyres Cu-Au récents ayant les caractéristiques La/Yb des typologies FI de faibles pressions de cristallisation (typologie favorable aux minéralisations porphyriques). Il est intéressant de noter que la Baie-James montre une majorité de TTG de typologie FI, donc reliée à un spectre ETR très fractionné et une source profonde du magma.

Le ciblage va consister à identifier les échantillons qui tombent dans le nouveau champ de fertilité (Figure 29) et qui vont également répondre favorablement au test potentiel porphyre Cu-Au (2011-07) via les indices simplifiés et étendus combinés. Au total, 11 échantillons ont été ciblés par cette méthodologie.

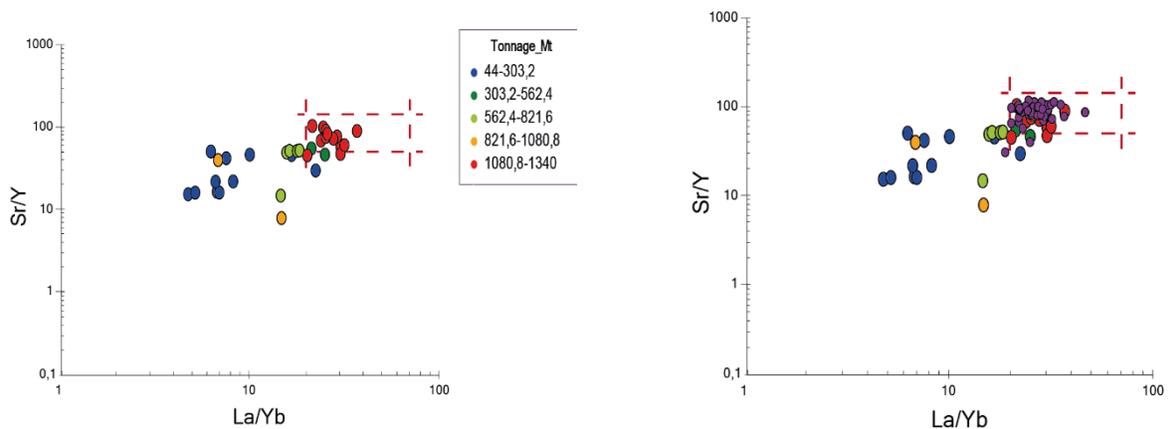


Figure 29 : Nouveau diagramme binaire de fertilité basé sur les rapports Sr/Y des plus gros porphyres Cu-Au récents ( $50 < Sr/Y < 150$ ) et les rapports La/Yb des plutons FI de basses pressions d'Abitibi (Chibougamau et Nomans).

Des pressions de cristallisation ont été calculées pour les échantillons lithogéochimiques correspondant aux échantillons de géochronologie lorsque cela était possible, afin d'avoir la meilleure contrainte possible. Sur l'ensemble du territoire de la Baie-James, il existe 134 datations publiées interprétées comme un âge de cristallisation. Parmi ces données, un tri a été effectué pour en conserver les échantillons de granitoïdes les plus frais. Un total de 13 échantillons répartis entre 2832 Ma et 2671 Ma a été sélectionné. Parmi elles, 7 sont compatibles avec la méthode de Yang (2017). Les pressions obtenues varient entre 1,3 kbar et 3,4 kbar soit un équivalent en profondeur entre 4 et 11 km. Trois secteurs montrent un intérêt supplémentaire pour un potentiel porphyrique par la combinaison des pressions calculées et des différentes cibles proposées précédemment (Figure 30).

Comparativement à la première phase sur les plutons en Abitibi, le territoire de la Baie-James présente probablement un potentiel porphyrique plus fort à l'Archéen, avec la dominante des typologies FI associées à des épaisseurs crustales plus importantes et des secteurs de faibles pressions de cristallisation. Reste à savoir si ces minéralisations associées à ce type de gisement ont pu être préservées au cours du temps sur ce territoire.

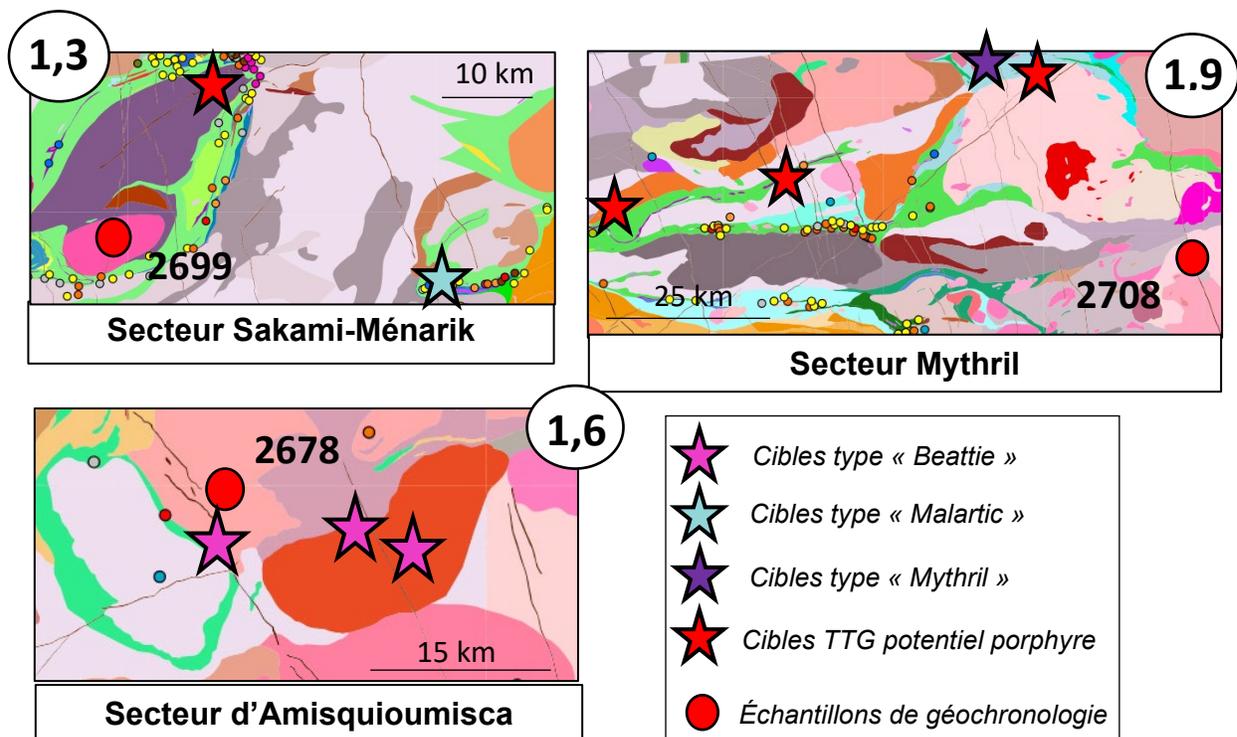


Figure 30 : Secteurs de faibles pressions de cristallisation (kbar). 1) Sakami-Ménarik : granite daté à 2699 Ma associé à une pression de 1,3 kbar; 2) Mythrill : granite daté à 2708 Ma associé à une pression de 1,9 kbar; 3) Amisquioumisca : granite daté à 2678 Ma associé à une pression de 1,6 kbar.

## CONCLUSION

Les deux phases de ce projet proposent de nouvelles approches pour classer les intrusions felsiques à intermédiaires à l'aide de diagrammes développés à partir de signatures archéennes. La pertinence du diagramme ternaire de Laurent *et al.* (2014), sur le territoire québécois (Abitibi et Baie-James) a été démontrée pour les signatures archéennes du Bouclier canadien. La discrimination est efficace pour classer les plutons en termes de familles d'intrusions (TTG ou SNK potentiels) puis de leur attribuer une lithologie respective. C'est un diagramme qui a été intégré à LithoModeleur pour aider à la classification des intrusions.

Pour la famille des TTG, il est possible de mettre en relation la typologie des intrusions (FI, FII ou FIII) sur les territoires d'Abitibi et de la Baie-James, avec des environnements géodynamiques favorables (croûte épaisse ou amincie) en fonction de modèles métallogéniques potentiellement associés (SMV ou porphyre). Pour les SNK (de type monzodiorite-monzonite-syérite), il est important de déterminer l'affinité magmatique du stock étudié (calco-alcalin ou alcalin) puis de s'intéresser aux teneurs en éléments traces, notamment l'enrichissement en HFSE.

Les pressions de cristallisation permettent de mettre en relation la profondeur approximative de mise en place de l'intrusion avec la profondeur de la source de son magma. Valable uniquement pour certaines caractéristiques d'intrusions, les équations empiriques de Yang mériteraient d'être explorées plus en détail afin d'en fixer des limites d'utilisation plus strictes pour une utilisation systématique pour les granitoïdes évolués. Ces résultats soulèvent également des réflexions au sujet de la géodynamique régionale en Abitibi au cours de l'Archéen. D'après les résultats, une croûte plus épaisse au nord-est semble coexister avec une croûte plus amincie au sud de la sous-province. Il est probable que cette différence soit reliée à des environnements géodynamiques différents. D'autres indices appuient cette hypothèse, avec la présence de plus larges bassins sédimentaires au nord ainsi que l'évolution S-N et O-E du gradient métamorphique schiste vert dominant à amphibolite en se rapprochant du contact Abitibi-Opatoca. Des niveaux crustaux plus profonds exhumés existent ainsi au nord-est, localement associés à des minéralisations porphyriques Cu-Au dans le secteur de Chibougamau.

La Baie-James révèle un potentiel intéressant pour les minéralisations porphyriques avec une dominante des intrusions felsiques FI associées à des secteurs de faibles pressions de cristallisation. Des intrusions appartenant potentiellement à la famille des SNK ont été suggérées, réparties sur l'ensemble du territoire, à partir du SIGÉOM. Cette nouvelle classification des intrusions permettra de nouvelles stratégies d'exploration à la Baie-James.

## REMERCIEMENTS

Je tenais sincèrement à remercier Jean-François Moyen et Michel Jébrak pour les nombreuses discussions autour des sulfureux sanukitoïdes. Également, je remercie Jean Goutier, Pierre Pilote, Silvain Rafini et Stéphane De Souza pour avoir généré de grandes réflexions permettant l'avancement des deux phases de ce projet. Enfin, merci à Benoit Lafrance et Réal Daigneault pour leurs suggestions et la relecture du rapport.

## RÉFÉRENCES

- Azevedo, C. (2015). Impact de la fusion partielle dans la ségrégation magmatique en contexte de base de croûte continentale fondue : implication dans la construction magmatique et métallogénique du nord-est de la Province du Supérieur (NEPS), Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 192p.
- Backeberg, N. R., Björkman, K. E., Rowe, C.D., Clark, J.R. (2018). Neoproterozoic supra-subduction gold in Mesoproterozoic tonalite-granodiorite: two separate mineralization events at Hammond Reef defined by disseminated and channelized fluid flow. *Precambrian Research*, 305, 111-124.
- Beakhouse, G.P. (2011). The Abitibi subprovince record: tectonic and metallogenic implications. Ontario Geological Survey, Open File Report 6268, p. 161.
- Bonin, B. (1990). From orogenic to anorogenic settings: evolution of granitoid suites after a major orogenesis. *Geological Journal*, 25, 261-270.
- Blevin, P.L., Chappell, B.W. (1992). The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science*, 83, 305-316.
- 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 Heberto. Mémoire de master, Nancy, 49p.
- Bigot, L., Jébrak, M. (2015). Gold mineralizations at syenite-hosted Beattie gold deposit at Duparquet, Archean Abitibi belt, Québec, Canada. *Economic Geology*, 110, 315-335.
- Chapon, B. (2011). Le porphyre Archéen à Mo-Cu±Au de Tilly, Baie-James, Québec. Rapport de maîtrise, UQAM, p193.
- Chiaradia, M., Caricchi, L. (2017). Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowments. Scientific reports, Nature, 7, 44523.
- Chiaradia, M. (2020). Gold endowments of porphyry deposits controlled by precipitation efficiency. Nature communications, 11:248.
- De Souza, S., Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Bécu, V., Lauzière, K. et Dupuis, C. (2023). Whole-rock lithogeochemistry of the Canadian Malartic mine, Abitibi, Superior Province, Québec. Geological Survey of Canada, Open File 8984, 1.
- Halla, J., Whitehouse, M.J., Ahmad, T., Bagai, Z. (2018). Archean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective. In *Crust-mantle interactions and granitoid diversification: insights from Archean cratons*. Geological Society, London, Special publications, 449, 1-18.
- Helt, K.M. (2012). The Canadian Malartic deposit: an example of oxidized intrusion-related gold mineralization in the Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, Université de McGill, 184p.
- Hugues, C.J. (1973). Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, 109, 513-527.
- Faure, S., Trépanier, S. (2011). Porphyres Cu-Au subalcalins : caractéristiques géochimiques et cibles d'exploration dans les terrains de haut grade métamorphique archéens et paléoprotérozoïques au Québec. Rapport CONSOREM 2011-07, p31.

- Fayol, N., Jébrak, M., Harris, L.B. (2016). The magnetic signature of Neoproterozoic alkaline intrusions and their related gold deposits: Significance and exploration implications. *Precambrian Research*, 283, 13-23.
- Fayol, N., Jébrak, M. (2017). Archean sanukitoid gold porphyry deposits: a new understanding and genetic model from the Lac bachelor gold deposit, Abitibi, Canada. *Economic Geology*, 112, 1913-1936.
- Fournier, E. (2017). Projet Eléonore, levé géologique été 2016 (2), Baie-James. GM 70043, 115p.
- Franklin, J.M. (2018). Volcanogenic massive sulfide deposits. Oral conference for Thunder Bay Short Course.
- Gaboury, D., Pearson, V. (2008). Rhyolite geochemical signatures and association with volcanogenic massive sulfide deposits: examples from the Abitibi belt, Canada. *Economic Geology*, 103, 1531-1562.
- 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.
- Gigoux, M. (2018). Vers un nouveau modèle d'exploration à la Baie-James : les granitoïdes aurifères. Rapport CONSOREM 2018, projet 2017-03, 59 p.
- Goscombe, B., Blewett, R., Czarnota, K., Groenewald, P., & Maas, R. (2009). Metamorphic evolution and integrated terrane analysis of the eastern Yilgarn Craton; rationale, methods, outcomes and interpretation. *Geoscience Australia Record*, 23, 1-270.
- 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.An. (1986). Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71, 1297-1313.
- Hart, T.R., Gibson, H.L., Leshner, C.M. (2004). Trace element geochemistry and petrogenesis of felsic volcanic rocks associated with volcanogenic massive Cu-Zn-Pb sulfide deposits. *Economic Geology*, 99, 1003-1013.
- Heilimo, E., Halla, J., Hölttä, P. (2010). Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos*, 115, 27-39.
- Hollis, S.P., Yeats, C.J., Wyche, S., Barnes, S.J., Ivanic, T. (2017b). VHMS mineralization in the Yilgarn Craton, Western Australia: a review of known deposits and prospectivity analysis of felsic volcanic rocks. In: *Geological Survey of Western Australia*, Report, 165, p. 68.
- Hollis, S.P., Podmore, D., James, M., Mole, D.R., Turner, O., Kneeshaw, A., Beaton, R. (2019). Targeting VHMS mineralization at Erayinia in the Eastern Goldfields superterrane using litho-geochemistry, soil chemistry and HyLogger data. *Journal of Geochemical Exploration*, 207.

- Huston, D.L., Champion, D.C., Cassidy, K.F. (2014). Tectonic controls on the endowment of Neoproterozoic cratons in volcanic-hosted massive sulfide deposits: evidence from lead and neodymium isotopes. *Economic Geology*, 109, 11-26.
- Keller, C.B., Schoene, B. (2012). Statistical geochemistry reveals disruption in secular lithospheric evolution about 2.5 Gyr ago. *Nature*, letter, 485, 490-495
- Lafrance, B. (2011). Typologie des intrusions associées aux grands couloirs de déformation de l'Abitibi et relations avec les minéralisations aurifères. Projet CONSOREM 2011-02.
- Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H. (2001a). The alteration Box Plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96, 957-971.
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J. F., Doucelance, R. (2014). The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205, 208-235.
- Leshner, C.M., Goodwin, A.M., Campbell, I.H., Gorton, M.P. (1985). Trace-element geochemistry of ore-associated and barren, felsic metavolcanic rocks in the Superior Province, Canada. *Can. J. Earth. Sci.*, 23, 222-237.
- Loiselle, M.C., Wones, D.R. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11, 468.
- Mathieu, L., Racicot, D. (2019). Petrogenetic study of the multiphase Chibougamau pluton: Archean magmas associated with Cu-Au magmato-hydrothermal systems. *Minerals*, 9:174.
- 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., p. 550.
- Mitrofanov, F.P., Zozulya, D.R., Bayanova, T.B., Levkovich, N.V. (2000). The world's oldest anorogenic alkali granitic magmatism in the Keivy structure on the Baltic Shield. *Doklady Earth sciences*, Russian Academy of Sciences, 374, 1145-1148.
- Mikhailova, J.A., Pakhomovsky, Ya.A., Ivanyuk, G.Yu., Bazai, A.V., Yakovenchuk, V.N., Elizarova, I.R., Kalashnikov, A.O. (2017). REE mineralogy and geochemistry of the Western Keivy peralkaline granite massif, Kola Peninsula, Russia. *Ore Geology reviews*, 82, 181-197.
- Moyen, J. F., Martin, H., Jayananda, M. (1997). Origine du granite fini-Archéen de Closepet (Inde du Sud) : apports de la modélisation géochimique du comportement des éléments en trace. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 325, 659-664.
- Moyen, J.F. (2000). Le magmatisme granitique à la transition Archéen-Protérozoïque : exemple du craton de Dharwar, Inde du Sud. (granite de Closepet et intrusions associées). Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 502 p.
- Moyen, J. F., Martin, H., Jayananda, M. (2001). Multi-element geochemical modelling of crust-mantle interactions during late-Archean crustal growth: the Closepet granite (South India). *Precambrian Research*, 112, 87-105.
- Moyen, J. F., Martin, H., Jayananda, M., Auvray, B. (2003). Late-Archean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India). *Precambrian Research*, 127, 103-123.

Moyen, J.F. (2014). Fusion partielle, granite et migmatites : la dynamique des croûtes chaudes archéennes. Conférence ICM, Rouyn-Noranda.

Moyen, J.F., Laurent, O. (2018), Archean tectonic systems: a view from igneous rocks. *Lithos*, 302-303, 99-125.

Moyen, J.F. (2019). Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin. Geological Society, London, Special publications, 489.

Percival, J.A., Skulski, T., Sanborn-Barrie, M., Stott, G., Leclair, A.D., Corkery, M.T., Boily, M. (2012). Geology and tectonic evolution of the Superior Province, Canada. Chapter 6 *In* Tectonic styles in Canada: the LITHOPROBE perspective. Edited by Percival, J.A., Cook, F.A., Clowes, R.M. (2012). *Geological Association of Canada*, special paper, 49, 32-378.

Racicot, D. (1979). Pétrographie et géochimie du pluton de la Rivière Barlow, Chibougamau, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, p125.

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.

Stern, R.A., Hanson, G.N., Shirey, S.B. (1989). Petrogenesis of mantle-derived, LILE-enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in southwestern Superior Province. *Can. J. Earth. Sci.*, 26, 1688-1712.

Stevenson, R., Henry, P., Gariépy, C. (1999). Assimilation-fractional crystallization origin of Archean Sanukitoid Suites: western Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, 96, 83-99.

Tatsumi Y. et Ishizaka K. (1982). Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan: petrographical and chemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60, 293-304.

Trépanier, S. (2008). Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. Projet CONSOREM 2008-07, p216.

Trépanier, S. (2012). Bilan de masse roches alcalines. Projet CONSOREM 2012-05.

Whalen, J.B., Currie, K. L., Chappell, B. W. (1987). A-Type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 407-419.

Yang, X.M. (2017). Estimation of crystallisation pressure of granite intrusions. *Lithos*, 286-287, 324-329.

Zozulya, D., Bayanova, T.B., Eby, N. (2005). Geology and age of the Late Archean Keivy Alkaline Province, Northeastern Baltic Shield. *The journal of Geology*, 113, 601-608.

Zozulya, D., Eby, N. (2006). Discrimination between Archean A-Type granitoids and sanukitoid suites using tectonic setting, geochemistry and fertility type. Conference paper.