

Chimico-stratigraphie volcanique et minéralisation volcanogène de la Ceinture archéenne de Colomb-Chaboullié, Baie James

Sarah Galloway, Pierre-Simon Ross, Daniel Bandyayera et Yannick Daoudene MB 2018-06



Avertissement

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

Chimico-stratigraphie volcanique et minéralisation volcanogène de la Ceinture archéenne de Colomb-Chaboullié, Baie James

Sarah Galloway¹, Pierre-Simon Ross¹, Daniel Bandyayera², Yannick Daoudene²

- 1. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9, Canada
- 2. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (Québec), 5700 4^e Av. O, Québec (QC), G1H 6R1, Canada

Soumis le 13 mars, 2018





Résumé

La Ceinture de roches vertes archéennes de Colomb-Chaboullié est située entre les sous-provinces de Nemiscau et d'Opatica, dans la Province du Supérieur. Cette ceinture est constituée de trois unités volcaniques : les coulées de basaltes, dominantes; des andésites variablement porphyriques; et des roches volcanoclastiques intermédiaires à felsiques. La ceinture contient des indices de sulfures à Au-Ag-Cu, incluant des sulfures massifs, semi-massifs et disséminés. La minéralisation est surtout comprise dans les basaltes et serait d'origine synvolcanique sur la base des observations de terrain.

Le projet de maîtrise en cours à l'INRS vise à améliorer notre compréhension volcanologique, stratigraphique, et géochimique de la Ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié, et à faciliter l'exploration pour les sulfures massifs volcanogènes dans la région. Les nouvelles connaissances sur la ceinture devraient aider à l'assigner soit à la Sous-province de l'Opatica, soit à la Sous-province de Nemiscau. À la suite de la cartographie régionale et de l'échantillonnage du MERN en 2015, une nouvelle campagne de terrain a eu lieu en 2016, ce qui a permis d'ajouter 45 échantillons de géochimie.

Les basaltes ont été divisés informellement en cinq unités géochimiques, dont trois principales, Acch1a, Acch1b, et Acch1c. Ces basaltes tholéiitiques à transitionnels ont été mis en place dans un environnement d'extension et montrent une contamination crustale qui augmente progressivement d'une unité à l'autre. Le reste des unités volcaniques est d'affinité transitionnelle à calco-alcaline. Les laves andésitiques (Acch2, Acch2a) et les roches volcanoclastiques intermédiaires (Acch3a) ont des compositions chimiques similaires. Les roches volcanoclastiques felsiques (Acch3b) montrent les signatures d'arc les plus fortes et ont été produites par contamination crustale et/ou témoignent de l'influence d'une zone de subduction.

Table des matières

Résumé	i
1. Introduction	1
2. Contexte géologique régional	3
2.1 Sous-province d'Opatica 2.2 Sous-province de Nemiscau	3 3
3. Problématique et objectifs	4
4. Méthodologie	5
4.1 Travail de terrain 4.2 Travail de laboratoire	5 6
5. Facies volcaniques de la ceinture de Colomb-Chaboullié	6
6. Géochimie des roches volcaniques	13
 6.1 Classification 6.2 Affinités magmatiques 6.3 Éléments en traces dans les laves mafiques (Acch1a à Acch1e) 6.4 Éléments en traces dans les andésites (laves intermédiaires) 6.5 Éléments en traces dans les roches volcanoclastiques intermédiaires à felsiques (Acch3a et Acch3b) 	15 15 17 18 21
7. Minéralisation	04
	24
8. Discussion et conclusion	24

1. Introduction

La ceinture volcano-sédimentaire de Colomb-Chaboullié est située dans la Province du Supérieur, dans la région de la Baie-James au Québec. Plus spécifiquement, la ceinture de Colomb-Chaboullié est située dans la zone de contact entre les sous-provinces de Nemiscau et d'Opatica, à 144 km au nord de Matagami et 80 km à l'est de Waskaganish (Fig. 1). En 2015, le MERN a cartographié les feuillets SNRC 32K13, 32K14, 32N03, et 32N04 à l'échelle 1 : 50 000, couvrant ainsi la ceinture de Colomb-Chaboullié (Bandyayera et al. 2015). Huit unités géologiques principales ont été définies pour la ceinture (Bandyayera et Daoudene 2017), dont trois unités volcaniques. Ces roches volcaniques constituent l'objet d'intérêt de la présente étude, notamment à cause de la présence d'indices de sulfures polymétalliques à Au-Ag-Cu, qui semblent indiquer un potentiel pour l'exploration des sulfures massifs volcanogènes (SMV). Il existe aussi un potentiel pour la minéralisation en Ni-ÉGP dans les intrusions mafiques à ultramafiques (Tague et al. 2017), mais ces intrusions ne sont pas incluses dans la présente étude.

Ce rapport résume les résultats obtenus jusqu'à maintenant, dans le cadre du projet de maîtrise en sciences de la terre de la première auteure à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS). Ce projet est supervisé par le deuxième auteur et supporté scientifiquement, logistiquement et financièrement par le MERN. Le projet porte sur la volcanologie, la stratigraphie, la pétrographie et la géochimie de la ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié.



Fig. 1. Carte géologique simplifiée de la Province du Supérieur dans la région de la Baie-James au Québec, montrant la localisation de la ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié entre les sous-provinces archéennes d'Opatica et de Nemiscau (d'après Bandyayera et Daoudene 2017).

2. Contexte géologique régional

La Province du Supérieur constitue la plus grande surface de roches archéennes au monde (Benn et Moyen 2008). Elle a été divisée en sous-provinces sur la base de différences lithologiques, métamorphiques, géophysiques et structurales (Card 1990). La ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié est située dans le secteur de contact entre deux de ces sous-provinces, l'Opatica au nord et le Nemiscau au sud.

2.1 Sous-province d'Opatica

La Sous-province d'Opatica est surtout constituée de roches intrusives (Bandyayera et Daoudene 2017) (Fig. 2). Les plus anciennes font partie du Pluton du Lac Rodayer, immédiatement au sud de ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié, et ont été datées autour de 2825 Ma (Davis et al. 1992). Dans la partie centrale de la Sous-province d'Opatica se trouve la ceinture volcano-sédimentaire de Frotet-Evans (Telmat et al. 2000; Boily et Dion 2002), qui contient la mine Troilus (Goodman et al. 2005). Les roches volcaniques sont surtout mafiques, tholéiitiques à calco-alcalines (Boily et Dion 2002). La meilleure estimation de l'âge de ces roches volcaniques est 2755 Ma (Bandyayera et Sharma 2001).

2.2 Sous-province de Nemiscau

La Sous-province de Nemiscau est principalement métasédimentaire (Hocq 1994; Bandyayera et Daoudene 2017). Elle demeurre peu connue dans la littérature. Les roches de la Sous-province de Nemiscau montrées sur la figure 2 sont assignées au Complexe de Rupert (Bandyayera et Daoudene 2017) et comprennent des paragneiss, des metatexites, des diatexites et des pegmatites granitiques. Plus au nord, de petites ceintures de roches vertes sont également présentes (Valiquette 1975).



Fig. 2. Carte géologique d'une partie des sous-provinces de Nemiscau et d'Opatica, situées respectivement au nord et au sud de la ceinture Colomb-Chaboullié (d'après Bandyayera et Daoudene 2017).

3. Problématique et objectifs

Les ceintures de roches vertes de la Baie-James sont passablement moins bien connues et explorées que les roches volcaniques de la Sous-province de l'Abitibi. La présence d'indices de sulfures de métaux usuels et précieux dans la ceinture de roches vertes de Colomb-Chaboullié semble indiquer qu'elle constitue une cible d'exploration pour les SVM. Toutefois, les activités d'exploration historiques demeurent limitées et l'origine des indices minéralisés (ex. tectonique ou syn-volcanique) n'est pas clairement documentée. Enfin, la stratigraphie et la structure de la ceinture de Colomb-Chaboullié demeurent imparfaitement connues, ce qui ne facilite pas l'exploration pour les SMV. Les objectifs du projet de maîtrise sont donc de :

- 1. Améliorer les connaissances sur la géologie, la stratigraphie, la pétrographie et la géochimie de la ceinture de Colomb-Chaboullié;
- 2. Déterminer l'origine des indices de sulfures polymétalliques;
- Recommander l'assignation de la ceinture de Colomb-Chaboullié à une des deux sous-provinces (Nemiscau ou Opatica) sur la base d'une comparaison géochimique et géochronologique.

Le présent rapport aborde seulement les deux premiers objectifs.

4. Méthodologie

4.1 Travail de terrain

La ceinture de Colomb-Chaboullié fait 72 x 5 km et elle est recouverte de terrains boisés ou marécageux, avec une faible densité d'affleurements. Le secteur d'étude choisi comprend la partie centrale de la ceinture et est traversé par la Route de la Baie-James entre 334 189 m E, 5 685 725 m N et 319 879 m E, 5 658 484 m N (UTM zone 18N). Le secteur d'étude a été sillonné et échantillonné par la première auteure sur une période de deux semaines en 2016, notamment le long de la route, qui forme une section plus ou moins N-S à travers la ceinture. D'autres affleurements ont été visités par hélicoptère afin d'échantillonner toutes les lithologies, y compris quelques affleurements à l'extérieur du secteur d'étude.

Les principaux indices polymétalliques à Au-Ag-Cu ont été visités. Le plus connu et mieux exposé, celui du Lac Marcaut (Riopel 1994), situé à 316 632 m E, 5 662 111 m N (UTM zone 18N), a été cartographié en détail avec de longs rubans à mesurer. La ligne de base pour la carte a été établie le long de la lentille principale de sulfures et se rapproche vraisemblablement du S₀.

4.2 Travail de laboratoire

Un total de 73 échantillons a été ramené à l'INRS. Cette collection comprend toutes les lithologies volcaniques et une partie des lithologies non-volcaniques. Les roches échantillonnées incluent des laves basaltiques (à intermédiaires) massives à coussinées, des andésites porphyriques massives, des roches volcanoclastiques intermédiaires à felsiques, des sulfures massifs à semi-massifs, ainsi que des schistes, gabbros, sédiments, et métasédiments. Suite au nettoyage des échantillons et à la préparation à la scie, 45 spécimens ont été choisis pour la géochimie ('cubes' de la taille d'un poing) et 34 pour des lames minces. Ce sont surtout des roches volcaniques, ou des roches potentiellement volcaniques. Trois plaques polies de sulfures ont aussi été préparées. Les nouvelles analyses géochimiques ont été faites chez Activation Laboratories (Ancaster, ON) en 2016 avec les méthodes habituelles des analyses lithogéochimiques du MERN. Ces analyses s'ajoutent aux 78 faites en 2015 par le MERN au même laboratoire, avec les mêmes méthodes.

5. Faciès volcaniques de la ceinture de Colomb-Chaboullié

La ceinture de Colomb-Chaboullié est composée d'unités sédimentaires, d'intrusions mafiques-ultramafiques, et d'unités volcaniques (Fig. 3). Deux zones de paragneiss (Acch7) sont présentes, une dans la partie NW du secteur d'étude et l'autre à l'extrémité ouest de la ceinture. Les unités clairement sédimentaires incluent un conglomérat polymicte (Acch8) et, au-delà du secteur d'étude, vers le SW, une formation de fer/quartzite (Acch6). Les corps intrusifs incluent des gabbros (Acch4) et des péridotites/pyroxénites (Acch5) et contiennent des minéralisations en Ni-ÉGP qui font l'objet d'une étude séparée à l'UQAC (Tague et al. 2017). La carte géologique du MERN divise les roches volcaniques en trois unités : les laves mafiques prédominantes (Acch1), les laves (±intrusions?) andésitiques (Acch2 et Acch2a), et les roches volcanoclastiques intermédiaires à felsiques (Acch3) (Bandyayera et al. 2015). Ces roches ont été métamorphisées au faciès des schistes verts et des amphibolites.





Les laves mafiques constituent environ 80% de la ceinture. Elles forment des coulées massives et coussinées. La texture est homogène, à grain fins (Fig. 4a). Les coussins sont variablement écrasés (Figs. 4b, 4c) et des schistes sont présents dans les secteurs les plus déformés (Fig. 4d). Là où les textures primaires sont les mieux préservées, on reconnaît de la hyaloclastite chloritisée entre les coussins (Fig. 4c). En lame mince, les basaltes sont composés de hornblende-plagioclase ± biotite ± chlorite ± épidote (Figs. 5a-d). La hornblende est tabulaire ou prismatique (Fig. 5c).

L'unité Acch2 est une andésite porphyrique (Figs. 6a and b), qui forme des coulées massives (±intrusions?) dans la partie est de la ceinture. Les phénocristaux (~20%) sont surtout des plagioclases de forme tabulaire (0,2 à 1,5 mm de long) (Fig. 6c). On note aussi des glomérocristaux de hornblende et moindrement de biotite. La matrice est recristallisée et elle est composée de plagioclase, de quartz, et d'amphibole (Fig. 6c).

L'unité Acch2a forme des coulées coussinées (Fig. 6d) contenant moins de phénocristaux (0-10%) que Acch2 (Figs. 6e et f). Les coussins sont déformés et font jusqu'à 1 m de long.

Les roches volcanoclastiques (Acch3) forment des lentilles à l'intérieur des basaltes. Certains affleurements felsiques présentent des laminations blanches à vertes (Fig. 7a), d'autres montrent des lapillis felsiques allongés (Fig. 7b), alors que d'autres, de composition intermédiaire, ont un aspect de grès gris, parfois laminés ou déformés (Fig. 7c). Les roches laminées de composition felsique sont composées principalement de quartz-plagioclase ± chlorite ± muscovite ± biotite ± calcite ± opaques. La muscovite est orientée dans la foliation (Fig. 7d).



Fig. 4. Photos de terrain pour les coulées de basalte (Acch1). (a) Échantillons de basalte montrant une texture homogène, à grains fins, (b) et (c) coussins déformés dans le basalte, et (d) basalte schisteux.



Fig. 5. Microphotographies pour les basaltes (Acch1). (a)-(b) lumière naturelle, (c)-(d) lumière polarisée. Bi = biotite, Hb = hornblende, Pg = plagioclase.



Fig. 6. Photos de terrain et au microscope pétrographique (lumière polarisée et lumière naturelle) des andésites. (a)-(c) Unité Acch2, fortement porphyrique (plagioclase, amphibole) et d'aspect massif. (d)-(f) Unité Acch2a, typiquement coussinée et faiblement porphyrique à aphyrique. Am = amphibole, Pg = plagioclase, Qz = quartz.



Fig. 7. Photos de terrain et au microscope pétrographique (lumière polarisée) des roches volcanoclastiques. (a) Tuf felsique laminé, avec alternance de bandes riches en plagioclase/quartz et riches en chlorite. (b) Tuf à lapillis felsiques (encerclés). (c) Roche volcanoclastique intermédiaire contenant du quartz boudiné. Ms = muscovite, Pg = plagioclase, Qz = quartz. (d) Couche riche en plagioclase et quartz provenant de l'affleurement montré en (a).

6. Géochimie des roches volcaniques

Suite à l'ajout des nouvelles analyses, la géochimie des roches volcaniques de la ceinture de Colomb-Chaboullié permet de raffiner la stratigraphie et d'améliorer légèrement la carte géologique. La majorité des échantillons ont été pris dans les parties peu altérées des roches volcaniques, ce qui fait que sur le graphique de la « boîte d'altération » (*alteration box plot*) de Large et al. (2001), les analyses tombent en grande majorité dans les boîtes des roches fraîches (Fig. 8a). Toutefois l'altération hydrothermale est présente par endroits dans les roches volcaniques, comme le montre l'abondance locale de chlorite et de grenat (Figs. 8b, 8c). Pour se prémunir contre les effets de l'altération et du métamorphisme, la majorité des éléments utilisés ici sont des éléments immobiles comme Al, Hf, Nb, Ta, Th, Ti, Y, Zr et les terres rares (voir p. ex. Winchester et Floyd 1977; Gifkins et al. 2005).

Les diagrammes utilisés permettent de séparer les basaltes du Groupe de Colomb-Chaboullié en cinq types, nommés informellement Acch1a à Acch1e, en fonction des éléments en traces. Les trois premiers (Acch1a à Acch1c) sont abondants alors que les deux derniers (Acch1d et Acch1e) sont rares. Les andésites restent organisées en Acch2 et Acch2a, comme sur la carte au 1:50 000 du MERN. Les roches volcanoclastiques sont séparées informellement en deux types selon leur degré de différentiation magmatique, soit Acch3a pour les roches intermédiaires et Acch3b pour les roches felsiques. Il faudrait probablement passer à l'échelle 1:20 000 pour pouvoir suivre les types géochimiques sur la carte géologique.



Fig. 8. (a) Diagramme de la « boîte d'altération » de Large et al. (2001) appliqué aux unités volcaniques de la ceinture de Colomb-Chaboullié. La boîte des basaltes de dorsales frais vient de Rogers et al. (2014) et les boîtes pour les volcanites d'arc sont tirées de Gifkins et al. (2005). (b)-(c) Altération locale en grenat et chlorite dans les coulées de basalte.

6.1 Classification

Les diagrammes de Winchester et Floyd (1977) montrent que les unités Acch1a, Acch1b et Acch1c sont majoritairement situées dans le champ des basaltes sub-alcalins (Figs. 9a, 9b). Toutefois, quelques échantillons sont dans le champ des andésites et andésites basaltiques sur la figure 9a. En moyenne, l'unité Acch1c possède un rapport Zr/TiO₂ plus élevé que les deux autres unités basaltiques principales. Les unités Acch1d et Acch1e sont aussi majoritairement basaltiques, mais deux échantillons de Acch1e se positionnent dans le groupe de points formé par les deux unités andésitiques et Acch3a sur la figure 9b.

Les unités Acch2, Acch2a et Acch3a se positionnent dans les champs andésite/andésite basaltique sur la figure 9a et dans le champ des basaltes sub-alcalins sur la figure 9b, mais avec des rapports Nb/Y et Zr/TiO₂ distinctement plus élevés que ceux des unités basaltiques de la ceinture.

Les échantillons de l'unité Acch3b ont des teneurs en SiO₂ allant de 66,3% à 80,5% et ils tombent dans les champs des dacites/rhyodacites et des rhyolites sur la figure 9a. Sur la figure 9b, ils se positionnent plutôt dans les champs des andésites et des dacites/rhyodacites à cause de leur teneur en Zr relativement peu élevée (94 - 309 ppm).

6.2 Affinités magmatiques

Les unités basaltiques sont d'affinité tholéiitique à transitionnelle sur le diagramme de Ross et Bédard (2009) (Fig. 9c). Plus spécifiquement, Acch1a, Acch1b et Acch1d sont tholéiitiques alors que les deux autres unités sont transitionnelles. Sur un diagramme TiO₂ en fonction du Zr, ces roches suivent la tendance d'enrichissement en Fe-Ti typique des séries tholéiitiques (Fig. 9d).



Fig. 9. (a)-(b) Diagrammes de classification des roches volcaniques de Winchester et Floyd (1977). (c) Diagramme d'affinités magmatiques de Ross et Bédard (2009). (d) Diagramme TiO₂ (%) en fonction du Zr (ppm) avec la tendance de la série tholéiitique selon MacLean et Barrett (1993). Les tendances calco-alcalines pour les arcs modernes de Kurile et Ryukyu ont été obtenues à partir des données de GEOROC (<u>http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/</u>).

Les andésites et les roches volcanoclastiques sont plutôt d'affinité calco-alcaline (Fig. 9c). Sur le diagramme TiO₂ en fonction du Zr, les unités Acch2, Acch2a et Acch3a ne sont pas dans la continuité de la tendance tholéiitique des basaltes, mais suivent plutôt une tendance à faible pente ressemblant à celle des roches calco-alcalines provenant des arcs volcaniques modernes. L'unité Acch3b forme une tendance séparée à plus faible rapport Ti/Zr et avec des valeurs en Zr similaires à celles des unités intermédiaires, ce qui laisse supposer que Acch3b n'est pas simplement la version plus évoluée des unités intermédiaires.

6.3 Éléments en traces dans les laves mafiques (Acch1a à Acch1e)

Sur les diagrammes des éléments en traces étendus, les échantillons de Acch1a ont un patron relativement plat avec des valeurs de Th faibles, rappelant ceux des basaltes des dorsales modernes (*mid-ocean ridge basalts*, MORB; Figs. 10a et 10e). Les profils s'inclinent progressivement pour les échantillons de Acch1b et de Acch1c; l'augmentation du Th permet de visualiser de petites anomalies négatives en Nb-Ta (Figs. 10b, 10c). Ces profils rappellent ceux des bassins d'arrière arc ou des tholéiites d'arcs (Fig. 10f). Eu égard à la forme des profils, ceux de Acch1d ressemblent le plus à ceux de Acch1b, alors que ceux de Acch1e s'apparentent le plus à ceux de Acch1c (Fig. 10d; voir aussi Fig. 9c).

Sur le diagramme de Pearce (2008), l'unité Acch1a présente les basaltes qui ont les compositions les plus mantelliques (*MORB-OIB array*, où MORB désigne les Basaltes des rides médio-océaniques et OIB désigne les basaltes des îles océaniques (*Ocean Island Basalts*), avec un échantillon très près du pôle N-MORB, indiquant que le magma est issu d'une source mantellique appauvrie (Fig. 11a). Les autres unités mafiques s'éloignent progressivement de ce pôle le long d'une courbe d'assimilation et de cristallisation fractionnée (AFC), avec la croûte archéenne moyenne (pôle AC; une composition moyenne) comme contaminant hypothétique, pour fins d'illustration. Les unités Acch1c et Acch1e ont les rapports Th/Yb les plus élevés parmi les basaltes, et seraient les plus contaminées.

Sur le diagramme de discrimination tectonique d'Agrawal et al. (2008), les échantillons des unités Acch1a et Acch1d se distribuent dans le champ MORB alors que ceux de l'unité Acch1c se placent dans le champ des basaltes d'arcs (*Island Arc Basalts*, IAB) (Fig. 11b). Les échantillons des unités Acch1b et Acch1e se répartissent à la limite MORB-IAB. Le diagramme de Wood (1980) montre une évolution similaire des échantillons depuis le champ des MORBs vers celui des basaltes d'arcs (Fig. 11c).

6.4 Éléments en traces dans les andésites (laves intermédiaires)

Les échantillons des unités Acch2 et Acch2a ont des profils d'éléments en traces étendus à forte pente, avec des anomalies négatives notables en Nb-Ta et Ti. Les profils des échantillons des deux unités sont similaires, et généralement ces échantillons occupent des positions comparables sur tous les diagrammes utilisés dans cette étude. La distinction entre les deux unités est donc plutôt texturale que géochimique.

Sur le diagramme de Pearce (2008), les andésites continent la tendance AFC des basaltes et ont une composition proche de celle de la croûte archéenne moyenne (Fig. 11a). Sur le diagramme d'Agrawal et al. (2008), les andésites sont dans le champ IAB (Fig. 11b). Sur le diagramme de Wood (1980), elles sont dans le champ des basaltes d'arc calco-alcalins (Fig. 11c), et elles sont plus riches en Th que le pôle de la croûte archéenne.



Fig. 10. Diagrammes d'éléments en traces, étendus et normalisés au manteau primitif (Sun et McDonough 1989), pour les basaltes de la ceinture de Colomb-Chaboullié des unités : (a) Acch1a, (b) Acch1b, (c) Acch1c et (d) Acch1d et Acch1e. Pour fins de comparaison, des diagrammes de basaltes archétypaux d'environnements tectoniques modernes sont illustrés dans ce qui suit : (e) N-MORB, E-MORB et OIB selon Sun and McDonough (1989), (f) basaltes tholéiitiques d'arc (IAT) et basaltes calco-alcalins (CAB) selon Stolz et al. (1990), ainsi que basaltes d'arrière arc (BABB) selon Ewart et al. (1994).



Fig. 11. Diagrammes pétrogénétiques et de discrimination des environnements tectoniques pour les basaltes et les laves andésitiques des unités Acch1 et Acch2. (a) Diagramme Th/Yb en fonction du Nb/Yb de Pearce (2008). (b) Diagramme d'Agrawal et al. (2008). DF1= 0.3518 $\log_e(La/Th) + 0.6013$ $\log_e(Sm/Th) - 1.3450 \log_e(Yb/Th) + 2.1056 \log_e(Nb/Th) -5.4763$; DF2= -0.3050 $\log_e(La/Th) - 1.1801$ $\log_e(Sm/Th) + 1.6189 \log_e(Yb/Th) + 1.2260 \log_e(Nb/Th) - 0.9944$. (c) Diagramme Th-Hf-Ta de Wood (1980). Le pôle de la croûte archéenne moyenne (AC) est de Rudnick et Fountain (1995). Abréviations : AFC = assimilation et cristallisation fractionnée; SE = l'enrichissement de la subduction; VAB = basaltes d'arc volcanique; WPB = basaltes intraplaque.



Fig. 12. Diagrammes d'éléments en traces étendus et normalisés au manteau primitif (Sun et McDonough 1989), pour les laves andésitiques des unités : (a) Acch2 et (b) Acch2a.

6.5 Éléments en traces dans les roches volcanoclastiques intermédiaires à felsiques (Acch3a et Acch3b)

Les échantillons de roches volcanoclastiques intermédiaires (Acch3a) montrent des caractéristiques chimiques similaires à celles des laves andésitiques sur les figures 9 et 13. Cette similarité laisse supposer que les unités Acch2 et Acch3a sont apparentées.

Quant aux roches volcanoclastiques felsiques (Acch3b), les figures 14a et 14b montrent un type « FI » ou « FII » semblant indiquer une source relativement profonde. Sur diagramme de discrimination d'environnements tectoniques de Pearce et al. (1984), les échantillons de l'unité Acch3b se répartissent dans le champ des arcs volcaniques (Fig. 14c), ce que confirme la pente prononcée et les anomalies négatives en Nb-Ta et Ti des spectres d'éléments traces étendus (Fig. 14d).



Fig. 13. Diagrammes pétrogénétiques, de discrimination des environnements tectoniques et d'éléments en traces étendus pour les roches volcanoclastiques intermédiaires (Acch3a). Voir figures 10 et 11 pour les sources des diagrammes et des facteurs de normalisation. Les champs vert et bleu englobent respectivement les échantillons de basaltes (Acch1) et d'andésites (Acch2), pour comparaison.



Fig. 14. Composition en éléments traces des roches volcanoclastiques felsiques (Acch3b). (a) Diagramme (La/Yb)_{cn} en fonction du Yb_{cn} selon Hart et al. (2004), (b) diagramme Zr/Y en fonction du Y d'après Lesher et al. (1986), (c) diagramme de discrimination des environnements tectoniques Ta en fonction du Yb de Pearce et al. (1984), et (d) diagramme d'éléments en traces étendus et normalisés au manteau primitif (Sun et McDonough 1989).

7. Minéralisation

Six indices de Au-Ag-Cu prennent place dans les roches volcaniques, incluant les roches volcanoclastiques. Cinq indices sont répartis dans les basaltes, au voisinage d'unités volcanoclastiques ou sédimentaires, et un indice est présent dans des roches volcanoclastiques. Un septième indice est compris dans des roches non-volcaniques de l'unité Acch7. À ces indices, la minéralisation prend la forme de sulfures massifs, semi-massifs, en veinules ou disséminés. Dans les laves coussinées, les disséminations de sulfures imprègnent le matériel hyaloclastique localisé entre les coussins (Figs. 15a, 15b). Le matériel intercoussin et les bordures des coussins sont aussi caractérisés par la présence de chlorite et de grenat dans certaines zones de la stratigraphie (Fig. 15c). Dans les coulées de lave massives, les sulfures forment des veinules (Fig. 15d).

L'indice le plus connu est celui du lac Marcaut, avec 8,37 g/t Au sur 3,9 m en forage (Riopel 1994). La minéralisation forme principalement une lentille de sulfures massifs à semi-massifs intercalée dans des roches volcaniques mafiques (Bandyayera et Daoudene 2017) (Fig. 15e). Ces sulfures se composent de pyrrhotite (40-90%) et de pyrite (40-50%), avec des proportions moindres de chalcopyrite (1%), de galène (1%) et d'arsénopyrite (trace) (Bandyayera et Daoudene 2017). Ces sulfures contiennent aussi 25% de fragments siliceux arrondis, d'une taille de 0,1 mm à 2 cm, et composés surtout de quartz et de pyrite (Figs. 16a à 16c). Il pourrait s'agir de fragments de rhyolite transportés sur le fond marin (Fig. 16d), bien que la forme arrondie puisse aussi être d'origine tectonique. En effet, une forte schistosité caractérise les basaltes hôtes des sulfures.



Fig. 15. Minéralisation en Au-Ag-Cu dans la ceinture de Colomb-Chaboullié. (a)-(b) Sulfures disséminés entre les coussins. (c) Zoom sur (b) montrant l'altération en chlorite et en grenant autour des sulfures. (d) Sulfures contrôlés par des fractures dans les laves massives. (e) Lentille de sulfures du lac Marcaut. Ba = basalte, CI = chlorite, Gr = grenat, V = veinules et veines.



Fig. 16. Photos des sulfures de l'indice du Lac Marcaut. (a) Tranche polie montrant les fragments siliceux (quartz, pyrite), entourés de pyrrhotite. (b)-(c) Photos des sulfures massifs en lumière réfléchie, montrant l'assemblage de pyrrhotite (Po), pyrite (Py) et chalcopyrite (Cyp). (d) Échantillon montrant les fragments siliceux typiques, ainsi qu'un fragment de rhyolite anguleux (encerclé) et des clastes chloriteux sub-arrondis dans la matrice à sulfures.

8. Discussion et conclusion

Les coulées de basalte et d'andésite de la ceinture de Colomb-Chaboullié se sont mises en place dans un environnement sous-marin, comme en témoigne les faciès coussinés et d'hyaloclastites. Comme les roches volcanoclastiques forment des lentilles dans ces coulées de lave, elles ont probablement été déposées dans le même environnement sous-marin.

Les roches volcaniques et volcanoclastiques de la ceinture ont des compositions allant du basalte à la rhyolite (Figs. 9a, 9b). Les basaltes sont d'affinité tholéiitique à transitionnelle, alors que les andésites et les roches volcanoclastiques sont calco-alcalines (Fig. 9c). Les basaltes viennent du manteau et montrent une contamination progressive selon une tendance AFC allant vers la croûte archéenne (Fig. 11a). En termes d'environnements tectoniques modernes, ces basaltes se seraient formés dans des environnements allant de la ride médio-océanique au bassin d'arrière-arc. Certains basaltes ressemblent même à des tholéiites d'arc. L'ensemble des caractéristiques chimiques des basaltes semble indiquer un contexte tectonique en extension lors de leur formation.

Les laves andésitiques et les roches volcanoclastiques intermédiaires sont chimiquement très différentes des basaltes. Cette différence peut être visualisée notamment par leur rapport Nb/Y plus élevé (Fig. 9b), leur tendance calco-alcaline sur le diagramme TiO₂ en fonction du Zr (Fig. 9d) et leur signature d'arc volcanique illustrée par l'allure de leur spectre des éléments en traces (Figs. 12a, 12b). Sur certains diagrammes utilisés dans cette étude, ces roches intermédiaires s'étendent au-delà du pôle de la croûte archéenne (Figs. 13a, b et c), et leur chimie ne peut donc pas être expliquée entièrement par la contamination d'un magma ayant une source similaire à celle des basaltes. Une dynamique de subduction aurait pu jouer un rôle dans la pétrogenèse de ces roches (Fig. 13c). L'influence d'une zone de subduction pourrait expliquer les valeurs élevées de Th, mais une

autre hypothèse est que les andésites sont contaminées par une composition plus riche en Th que la moyenne de la croûte archéenne.

La présence de sulfures disséminés entre les coussins, en association avec la chlorite et le grenat entre les coussins et dans leurs bordures, semble indiquer que l'altération hydrothermale et la minéralisation remplissent la porosité primaire et remplacent le verre volcanique. Si tel est le cas, la minéralisation serait synvolcanique et non tardive. Dans les basaltes massifs, les sulfures remplissent des fractures, formant un stockwork accompagné de chlorite, ce qui est aussi un aspect typique d'une minéralisation volcanogène.

Références

- Agrawal S, Guevara M, Verma SP (2008) Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements. International Geology Review 50(12):1057-1079
- Bandyayera D, Sharma KNM (2001) Minéralisations en Ni-Cu ± EPG dans la bande volcano-sedimentaire de Frotet-Evans (SNRC 32K)
- Bandyayera D, Daoudene Y, Bourassa S (2015) Géologie de la région du lac Nemiscau, Secteur du lac Rodayer. Ministère des Ressources naturelles Québec; CG-2015-05
- Bandyayera D, Daoudene Y (2017) Géologie de la région du lac Rodayer (SNRC 32K13-32K14-32N03 et 32N04-SE). Ministère des Ressources naturelles Québec; RG 2017-01, 57 p.
- Benn K, Moyen JF (2008) The Late Archean Abitibi-Opatica terrane, Superior Province; A modified oceanic plateau. Special Paper 440. The Geological Society of America, p. 173-197

- Boily M, Dion C (2002) Geochemistry of boninite-type volcanic rocks in the Frotet-Evans greenstone belt, Opatica subprovince, Quebec: implications for the evolution of Archaean greenstone belts. Precambrian Research 115:349-371
- Card K (1990) A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archean accretion. Precambrian Research 48:99-156
- Davis WJ, Sawyer E, Machado N, Gariépy C, Benn K (1992) U-Pb geochronology of plutonism and metamorphism in the Opatica Belt: Initial Results. Lithoprobe report 33, pp 147-149
- Ewart A, Bryan WB, Chappell BW, Rudnick RL (1994) Regional geochemistry of the Lau-Tonga arc and backarc systems. Proceesings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 135:385-425
- Gifkins C, Herrmann W, Large R (2005) Altered volcanic rocks; a guide to description and interpretaion. Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Australia, 275 p.
- Goodman S, Williams-Jones AE, Carles P (2005) Structural controls on the Archean Troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada. Economic Geology 100(3):177-582
- Hart TR, Gibson HL, Lesher CM (2004) Trace element geochemistry and petrogenesis of felsic volcanic rocks associated with volcanogenic massive Cu-Zn-Pb sulfide deposits. Economic Geology 99:1003-1013
- Hocq M (1994) La Province du Supérier. In: Dubé C (ed) Géologie du Québec. Les publications du Québec, p. 7-20

- Large RR, Gemmell JB, Paulick H, Huston DL (2001) 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.
- Lesher CM, Goodwin AM, Campbell IH, Gorton MP (1985) Trace-element geochemistry of ore-associated and barren, felsic metavolcanic rocks in the Superior Province, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences 23:222-237
- MacLean W, Barrett T, (1993) Lithogeochemical techniques using immobile elements. Journal of geochemical exploration 48:109-133.
- Pearce JA, Harris, N, Tindle AG (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of graniric rocks. Journal of Petrology 25(4): 956-983
- Pearce JA (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos 100:14-48
- Riopel J (1994) Rapport technique des travaux, campagne 1994, propriété Lac Marcaut. Rapport statutaire déposé au Ministère des Ressources naturelles Québec. GM 53629 p. 330
- Rogers R, Ross P-S, Goutier J, Mercier-Langevin P (2014) Using Physical Volcanology, Chemical Stratigraphy, and Pyrite Geochemistry for Volcanogenic Massive Sulfide Exploration: An Example from the Blake Rive Group, Abitibi Greenstone Belt. Economic Geology 109:61-88.

- Ross P-S, Bédard JH (2009) Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace element discriminant diagrams. Canadian Journal of Earth Sciences 46:823-839
- Rudnick RL, Fountain DM (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Reviews of geophysics 33:267-309.
- Stolz AJ, Varne R, Davies GR, Wheller GE, Foden JD (1990) Magma source components in an arc-continent collision zone: The Flores-Lembata sector, Sunda Arc, Indonesia. Contributions to Mineralogy and Petrology 105:585-601
- Sun S-S, McDonough WF (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *in* Saunders AD, Norry MJ (eds) Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication 42:313-345
- Tague PD, Page P, Barnes SJ, Bandyayera D, Daoudene Y (2017) Caractérisation pétrologique et géochimique des intrusions mafiques et ultramafiques de la ceinture de Colomb-Chaboullié (Baie-James). Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MB 2017-06, 57 p.
- Telmat H, Mareschal J-C, Gariépy C, David J, Antonuk CN (2000) Crustal models of the eastern Superior Province, Quebec, derived from new gravity data. Canadian Journal of Earth Sciences 37:385-397
- Valiquette G (1975) Région de la Rivière Nemiscau. Ministère des Ressources naturelles Québec; RG 158, 156 p.

- Winchester JA, Floyd PA (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology 20:325-343
- Wood DA (1980) The application of a Th-Hf-Ta Diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth and Planetary Science Letters 50:11-30