

Délimitation des réservoirs de fluides et longévité des événements associés à la minéralisation aurifère d'origine hydrothermale du camp minier Malartic–Val-d'Or dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, au Québec

M. Herzog¹, C. LaFlamme¹, G. Beaudoin¹ et B. Quesnel¹

¹Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, Québec,

INTRODUCTION

La recherche dans le domaine des ressources minérales demeurera pertinente tant qu'elle s'avèrera un moyen efficace de mieux comprendre non seulement les processus connexes d'échelle variable qui sont à l'origine de l'accumulation des métaux mais aussi leur niveau d'interaction à de plus petites échelles (c.-à-d., des phénomènes tectoniques d'échelle régionale aux interactions fluides-roches à l'échelle microscopique). Le but du présent rapport d'étude est de déchiffrer les circonstances entourant le dossier temporel et l'empreinte laissés par les événements à l'origine de fluides hydrothermaux; ces derniers seront examinés en détail à quelques gîtes d'or de type orogénique choisis situés dans la région riche en or du camp minier de Malartic–Val-d'Or de la Sous-province d'Abitibi, laquelle a déjà fait l'objet d'études sérieuses (Beaudoin et Pitre, 2005; Beaudoin et Chiaradia, 2016). Isoler et comprendre à l'échelle du camp minier les liens structuraux et lithologiques d'événements individuels à l'origine de fluides hydrothermaux se fera grâce à la combinaison d'observations sur le terrain effectuées le long des transects de Malartic à l'échelle de la région avec des observations détaillées et circonscrites dans le temps relevées directement à l'endroit de venues et de gîtes d'or de type orogénique individuels. Le soufre est le ligand complexant qui joue le rôle le plus important dans la précipitation de minéraux sulfurés aurifères à partir de fluides aqueux (Loucks et Mavrogenes, 1999); c'est pourquoi il est essentiel de comprendre son cheminement afin de pouvoir établir avec précision la nature des réservoirs, des structures et des processus responsables de l'accumulation de l'or à l'échelle du camp minier (e.g., Farquhar and Wing, 2003; LaFlamme et al., 2018).

Des observations préliminaires sur le terrain révèlent que la mise en place de minerais aurifères subéconomiques dans les suites volcaniques de la région de Malartic–Val-d'Or peut avoir contribué à la richesse exceptionnelle en or qui a été découverte associée aux filons de cisaillement de phase tardive contrôlés par la structure et composés de quartz-tourmaline±carbonate de la Sous-province d'Abitibi. Les résultats découlant de ce projet fourniront des renseignements au sujet de la longévité des événements associés à la minéralisation aurifère d'origine hydrothermale étant survenus au cours d'une phase unique ou au cours de phases multiples, ainsi qu'au sujet des sources et des diverses conditions physicochimiques responsables de la précipitation d'or à l'échelle du camp minier. Les connaissances susceptibles de contribuer à la poursuite réussie de travaux d'exploration des gîtes d'or de type orogénique bénéficieront également du recours aux techniques d'analyse in situ de haute résolution comme la datation radiométrique U-Pb à l'aide de la spectrométrie de masse à source à plasma inductif avec prélèvement par ablation laser (LA-ICP-MS), l'analyse multi-isotopique du soufre à l'aide de la spectrométrie de masse d'ions secondaires, les analyses isotopiques Re-Os et LA-ICP-MS triple quadripôle, ainsi que la cartographie des éléments de manière quantitative à l'aide de la méthode LA-ICP-MS à l'échelle des minéraux sulfurés. En outre, ces connaissances contribueront à une meilleure compréhension du lien qui existe entre le taux d'enrichissement en or et en sulfures de régions ciblées rentables récemment découvertes et considérées stériles et les processus minéralisateurs connexes d'âge archéen.

GÉOLOGIE RÉGIONALE

La Sous-province d'Abitibi, un terrane archéen de roches vertes situé à la limite sud-est du craton du Supérieur, se compose de roches faiblement à moyennement métamorphisées (figure 1) qui montrent des liens géologiques primaires bien conservés dans les roches intrusives et volcaniques métamorphisées, ainsi que dans les roches sédimentaires métamorphisées. D'importantes suites volcaniques sous-marines de composition ultramafique, mafique et felsique (environ 2795 à 2695 Ma) et des dômes de roches intrusives connexes à tonalite, granodiorite, diorite et monzonite qui leur sont reliés dans le temps portent les traces d'une foliation d'orientation est et à fort pendage qui s'est produite au cours d'épisodes d'enfouissement et d'épaississement important de la croûte. La tectonique à couche épaisse survenue entre 2690 et 2669 Ma a entraîné la formation de roches sédimentaires à faciès de flysch et à faciès de molasse provenant de milieu terrestre qui recouvrent maintenant en discordance les suites volcaniques (par ex. Pyke et al., 1973; Dimroth et al., 1978; Hyde, 1980; Ross et al., 2011a, b; Monecke et al., 2017). Des gîtes importants de métaux communs et précieux se sont formés au point de contact sud avec les roches sédimentaires fortement métamorphisées de la Sous-province de Pontiac qui est délimitée par la zone de failles de Larder Lake–Cadillac (LLCFZ) d'orientation est–ouest et par l'embranchement formant la zone de failles de Porcupine–Destor (PDFZ) orientée vers le nord (par ex., Ayer et al., 2005; Thurston et al., 2008; Hastie et al., 2016; Bedeaux et al., 2017). Les camps miniers aurifères qui partagent une association spatiale le long de ces deux corridors structuraux renferment jusqu'à 6043,4 t (194,3 million d'onces) d'or, dont 2765,1 t (88,9 million d'onces) se trouvent dans les camps de la PDFZ et jusqu'à 3278,3 t (105,4 million d'onces) sont dans les camps de la LLCFZ; 27,3 % de la quantité totale, soit 1649,7 t (53,04 million d'onces), reposent sous le camp minier de Malartic–Val-d'Or (Gosselin et Dubé, 2005; Dubé et Gosselin, 2007; Dubé et al., 2017; Monecke et al., 2017).

MÉTHODOLOGIE

Le cadre de cette étude se fonde sur des échantillons à contrôle structural recueillis dans divers venues et gîtes d'or de type orogénique du camp minier de Malartic–Val-d'Or au cours de travaux sur le terrain effectués en 2019 dans la région de gîtes de Canadian Malartic, Goldex, Triangle et Pascal's Gold Trend. Les liens au niveau de la structure, de la lithologie et de l'altération existant entre les filons, la minéralisation et le caractère lithologique des roches encaissantes ont été consignés et vérifiés au moyen d'échantillons afin d'être circonscrits précisément aussi bien dans le temps que dans l'espace à l'échelle du camp. Des échantillons représentatifs seront soumis à des analyses pétrographiques au moyen d'un microscope optique et serviront à la caractérisation détaillée des associations des minéraux sulfurés et à la détermination de l'évolution pétrogénétique au moyen d'un microscope électronique à balayage en vue d'établir aussi bien le moment auquel la minéralisation a eu lieu au sein des séquences que le rapport entre les minéraux sulfurés et l'or. Des analyses in situ par la méthode LA-ICP-MS du xénotime, un minéral accessoire radiogénique, serviront à établir l'âge des événements individuels à l'origine de fluides hydrothermaux dont les caractéristiques ont été déterminées auparavant et les associations de minéraux sulfurés (par ex., Petrella et al., 2019). En outre, l'analyse multi-isotopique du soufre à l'aide de la spectrométrie de masse d'ions secondaires (LaFlamme et al., 2016) permettra d'identifier les divers réservoirs contenant du soufre à l'origine de la formation des gîtes minéraux et les conditions changeantes au niveau de la pression et de la température et de la fugacité de l'oxygène à l'échelle des grains minéraux. En outre, une nouvelle approche à l'analyse multi-isotopique du soufre au moyen de la méthode LA-ICP-MS triple quadripôle sera tentée afin de réduire le temps nécessaire à la préparation et à l'analyse des échantillons (par ex. Diez Fernández et al., 2012). Des travaux additionnels de cartographie des éléments de manière quantitative à l'aide de la méthode LA-ICP-MS des associations de minéraux sulfurés individuels aideront à caractériser l'empreinte géochimique distincte des événements associés à la minéralisation aurifère d'origine hydrothermale à l'échelle des grains minéraux. Enfin, des associations de minéraux sulfurés bien caractérisées au niveau de leur paragenèse feront l'objet d'analyses par la méthode isotopique Re-Os en vue d'évaluer dans quelle mesure des composantes crustales auraient pu être impliquées au niveau des réservoirs de fluides hydrothermaux, tel que décrit dans Mathur et collaborateurs (2000) ou dans Ootes et collaborateurs (2011).

GÉOLOGIE ET MINÉRALISATION AU CAMP MINIER MALARTIC–VAL-D'OR

Dans le camp minier Malartic–Val-d’Or, les associations chronostratigraphiques prédominantes comprennent les suites volcaniques des assemblages de Kidd–Munro (2720 à 2710 Ma), de Tisdale (2710 à 2704 Ma) et de Blake River (2704 à 2695 Ma), ainsi que les suites sédimentaires des assemblages de Porcupine (2690 à 2685 Ma) et de Timiskaming (2679 à 2669 Ma) (Ayer et al., 2002, 2005; Thurston et al., 2008; Monecke et al., 2017). Presque toute la minéralisation entre les municipalités de Malartic et de Val-d’Or se manifeste dans les assemblages de Tisdale et de Blake River (figure 1) qui chevauchent la LLCFZ d’orientation est-sud-est, laquelle jouxte des roches fortement métamorphisées de la Sous-province de Pontiac au sud. L’évolution volcanogénique et métallogénique du camp Malartic–Val-d’Or est révélée plus en détail dans les notations de Pilote et collaborateurs (1997) ainsi que Scott et collaborateurs (2002) qui se sont fondés sur les ouvrages de Latulippe (1966), Imreh (1984) et Dimroth et collaborateurs (1983a), lesquels ont été les premiers à utiliser le terme « Groupe de Malartic » et les désignations des unités lithologiques qui lui sont associées. L’unité lithologique inférieure du groupe de Malartic, soit la formation de La Motte–Vassan (2714 ±2 Ma), renferme des komatiites et d’autres roches ultramafiques extrusives. Au-dessus, la formation de Dubuisson (2708 ±2 Ma) témoigne d’une évolution magmatique continue et est constituée de roches volcaniques de composition ultramafique à mafique accompagnées à certains endroits de quelques roches felsiques (Pilote et al., 1997, 1998a, b, c). L’unité lithologique supérieure du groupe de Malartic, soit la formation de Jacola (2706 ±2 Ma), se compose principalement de roches volcaniques mafiques et d’hyaloclastites qui témoignent d’une interaction avec des eaux de mer au cours de l’Archéen et de sa mise en place en milieu peu profond (Machado et Gariépy, 1994). Le groupe de Louvicourt, qui repose en concordance sur le groupe de Malartic, est constitué de la formation de Val d’Or (2704 ±1 Ma) aux laves basaltiques en coussins et aux roches pyroclastiques de composition andésitique, et de la formation de Héva (2702 ±2 Ma), aux roches volcanoclastiques de composition mafique à felsique (Machado et Gariépy, 1994; Pilote et al., 1998a, b, c).

Une phase précoce de déformation par compression (D₁) a causé le plissement et le basculement de la suite volcanique ainsi qu’entraîné une inclinaison générale vers le nord. Les structures renfermant de l’or dans le sud de la Sous-province d’Abitibi sont étroitement liées à une phase de déformation par compression subséquente (D₂) qui est à l’origine d’une fabrique planaire S₂ quasi subverticale d’orientation est–ouest à est–nord-ouest et qui gît à proximité de quelques segments structuraux d’orientation est–ouest dont le fusionnement a donné la LLCFZ (Bedeaux et al., 2017). Cette fabrique régionale est recoupée par des zones de cisaillement inverse de second et de troisième ordre dont le pendage varie de faible à abrupt et qui sont apparentées à D₃, un décrochement dextre tardif le long de la LLCFZ; ces zones de cisaillement renferment la majorité des filons à minéralisation en or de type orogénique (Robert et al., 2005; Dubé et Gosselin, 2007; Dubé et al., 2017). Ce type de filon dans le camp minier Malartic–Val-d’Or renferme couramment des associations minérales de quartz-carbonate ou de quartz-tourmaline-carbonate dont la teneur en sulfures varie selon qu’ils se manifestent dans les enveloppes de roches encaissantes altérées accompagnés de filons ou dans des agglomérats de minéraux sulfurés au sein de filons (par ex. Robert et al., 2005). Parallèlement, un métamorphisme régional de degré faible à moyen a eu une incidence sur la Sous-province d’Abitibi et se serait produit entre 2669 et 2643 Ma (Powell et al., 1995). Une suite d’intrusions alcalines syntectonique (2685 à 2671 Ma) et des roches métamorphisées de la Sous-province de Pontiac renferme le gîte aurifère à stockwerk disséminé de Canadian Malartic (2664 ±11 Ma; De Souza et al., 2017). De nombreuses roches intrusives renfermant une minéralisation aurifère se retrouvent à l’est; par exemple, les filons de quartz et tourmaline à pendage sud du gîte de Goldex (figure 1) sont encaissés dans un filon-couche de granodiorite parallèle à la stratification et les filons de quartz, tourmaline et carbonate à pendage sud du gîte de Triangle bordent des zones de cisaillement au sein d’une intrusion de diorite subverticale. Au gîte de Pascalis Gold Trend, à l’ouest du batholite de Bourlamaque, dont l’âge remonte à plus de 2695 Ma et dont la composition varie de la tonalite à la granodiorite (Wong et al., 1991), la minéralisation en or est spatialement liée à des séries empilées de filons de quartz-tourmaline subhorizontaux.

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

En fonction de liens de recoupement observés au cours de la campagne de travaux sur le terrain, une série de paragenèses préliminaires des filons relevés d’un bout à l’autre du camp minier de Malartic–Val-d’Or dans des

gîtes aurifères contrôlés par la structure révèle le caractère hétérogène des associations minérales des filons. Tous les filons recoupent la foliation pénétrante S₂ à pendage subvertical et dont l'orientation varie de l'est au nord-ouest; cette foliation s'est développée dans la suite de roches encaissantes (méta-) volcaniques, intrusives et sédimentaires. Au gîte de Canadian Malartic, quatre générations de filons dans les corps minéralisés de Barnat et de Sladen occupant le prolongement prévu de la propriété East Malartic de la LLCFZ sont encaissées respectivement dans la diorite porphyrique silicifiée et fortement albitisée et dans l'argilite ou le grauwaacke, également silicifiés mais moins profondément albitisés, de ces deux corps. Des filons bleutés, ondulés et de taille centimétrique de seconde génération au gîte de Canadian Malartic (V_{2CM}; quartz–albite–K-feldspath±biotite±sulfures) se transforment progressivement en filons de quartz transparent massifs atteignant jusqu'à 1 m d'épaisseur et renferment un peu d'or. Les filons V_{3CM} de taille centimétrique et partiellement bréchifiés renferment la majorité de la pyrite de taille millimétrique et de la minéralisation aurifère connexe dans un filon à association de quartz-ankérite-calcite-albite-biotite/chlorite-sulfure±épidote±hématite. D'autre part, les quatre générations de filons identifiées au gîte de Goldex, dont les fractures sont remplies d'une association minérale de quartz et de tourmaline qui s'est développée au sein d'une seule zone de cisaillement, présentent des signes de profonde altération en albite-séricite et en tourmaline liée à la formation de filons dans la granodiorite encaissante. Une série précoce de filons V_{1GX} plats et faiblement métamorphisés à fluorite-tourmaline-chlorite±épidote contient moins de 2 % de pyrite. À mesure qu'ils se rapprochent de zones de cisaillement de 0,5 à 1 m de largeur, les filons V_{1GX} plats se transforment progressivement en importantes zones de cisaillement aurifères constituées de quartz-tourmaline-pyrite-fluorite-carbonate-chlorite±épidote ainsi que de pyrite et de sulfures de taille millimétrique à centimétrique (contenu se situant entre 10 et 15 %); ces zones sont associées principalement aux zones à filons tourmalinisés.

Des filons de quartz et tourmaline du gîte de Triangle, dans la propriété Lamaque, partagent certaines similitudes avec les filons minéralisés du gîte de Goldex, notamment l'altération pénétrante de quartz-séricite-albite caractérisant les roches encaissantes, soit la diorite au pendage subvertical et les roches volcaniques silicifiées de composition basaltique à andésitique. Néanmoins, un réseau anastomosé de zones de cisaillement inverse à fort pendage renferme au moins quatre générations différentes de filons à structure à boudins et étranglements le long de la même structure; ces filons sont constitués de quartz et tourmaline massifs dont l'épaisseur peut atteindre 7 m dans certaines sections des filons. Un sous-ensemble de filons de quartz-tourmaline±carbonate (V_{2LQ}) a été mis en place avant la minéralisation et ne renferme qu'une faible quantité d'or et localement quelques traces (moins de 2 %) de minéraux sulfurés. L'or encaissé dans le sous-ensemble V_{2ALQ} est contenu dans des grains de pyrite de taille millimétrique à centimétrique qui ont été observés dans de la tourmaline à brèche avec ou sans quartz. La majorité de l'or se manifeste au centre de zones de cisaillement inverse sous forme de filons V_{3LQ} de quartz-carbonate-sulfure (contiennent de 15 à 20 % de sulfures) qui renferment de l'or visible dans des agrégats sulfurés de pyrite-chalcopyrite de quelques centimètres de taille qu'accompagnent par endroits de la sphalérite à structure en nid d'abeilles et de la galène brune. Au gîte de Pascalis Gold Trend, dont la mise en valeur vient de débiter, des filons de quartz-tourmaline qui atteignent jusqu'à 1,5 m d'épaisseur se manifestent le long de zones de cisaillement senestre à pendage subvertical et se reconnaissent à leurs filons plats empilés de taille centimétrique à métrique et à pendage subhorizontal qui dissèquent les roches encaissantes mafiques aussi bien intrusives que volcaniques et qui se forment entre les zones de cisaillement. Quatre générations contrastantes de filons renferment une minéralisation qui se manifeste dans l'ensemble dans de minces filons précoces riches en sulfures ou dans une enveloppe d'altération qui se forme dans une variété de roches encaissantes et qui entoure les filons tardifs. Les processus d'altération les plus remarquables, liés au remplissage de quartz-tourmaline des filons, sont l'altération en chlorite et en quartz et la tourmalinisation. Un premier réseau de filons à minéralisation aurifère faible à intermédiaire (V_{0PGT} et V_{1PGT}) dont la présence a été notée dans du basalte (figure 3) est subparallèle à S₀ et consiste en des associations de minces filons de sulfure-quartz±carbonate et de quartz-sulfure de taille millimétrique à centimétrique. Néanmoins, la majorité de l'or se trouve encaissée dans un deuxième réseau de filons de dolomite-quartz (V_{2PGT}) et de quartz-tourmaline±carbonate (V_{3PGT}), soit au contact du filon avec les roches encaissantes, soit dans des auréoles d'altération causées par la tourmalinisation au sein de grains de pyrite automorphe dont la taille peut atteindre jusqu'à 5 cm. Des observations préliminaires faites sur le terrain révèlent la présence possible de faibles teneurs

en or de moins de 0,5 ppm dans la suite de roches volcaniques encaissantes avant que ne se soient produits les principaux épisodes de déformation par compression (D₂ et D₃) qui ont été à l'origine de la formation de la plupart des structures aurifères de second et de troisième ordre du camp minier de Malartic–Val-d'Or.

REMERCIEMENTS

Ce projet d'étude de doctorat a reçu du soutien financier de l'initiative *Metal Earth* par le biais du Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada. Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance envers les employés des sociétés Agnico Eagle, Canadian Malartic, Eldorado Gold et Probe Metals Inc. qui leur ont fourni de l'aide au niveau des aspects organisationnels du projet et leur ont permis l'accès aux sites miniers et aux collections de carottes. L'aide fournie par le personnel œuvrant pour l'initiative *Metal Earth* et celui œuvrant sur le transect de Malartic, ainsi que par l'auxiliaire de travaux sur le terrain, l'étudiant de premier cycle, I. Stephenson a été tout particulièrement appréciée.

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat entreprise par Michael Herzog au Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval sous la direction de Crystal LaFlamme (Ph.D.) et de Georges Beaudoin (Ph.D.).

Contribution MERC-ME-2019-235 du Centre de recherches en exploration minérale de l'École des sciences de la Terre Harquail.

RÉFÉRENCES

- Ayer, J.A., Amelin, Y., Corfu, F., Kamo, S., Ketchum, J., Kwok, K. et Trowell, N. 2002. Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U-Pb geochronology: autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation; *Precambrian Research*, v. 115, p. 63–95.
- Ayer, J.A., Thurston, P.C., Bateman, R. Dubé, B., Gibson, H.L., Hamilton, M.A., Hathway, B., Hocker, S.M., Houlié, M.G., Hudak, G., Ispolatov, V.O., Lafrance, B., Leshner, C.M., MacDonald, P.J., Péloquin, A.S., Piercey, S.J., Reed, L.E. et Thompson, P.H. 2005. Overview of results from the Greenstone Architecture Project: Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey Open File Report 6154, 146 p.
- Beakhouse, G.P. 2011. The Abitibi subprovince plutonic record: tectonic and metallogenic implications; Ontario Geological Survey Open File Report 6268, 161 p.
- Beaudoin, G. et Pitre, D. 2005. Stable isotope geochemistry of the Archean Val-d'Or (Canada) orogenic gold vein field; *Mineralium Deposita*, v. 40, p. 59–75.
- Beaudoin, G. et Chiaradia, M. 2016. Fluid mixing in orogenic gold deposits: evidence from the H-O-Sr isotope composition of the Val-d'Or vein field (Abitibi, Canada); *Chemical Geology*, v. 437, p. 7–18.
- Bedeaux, P., Pilote, P., Daigneault, R. et Rafini, S. 2017. Synthesis of the structural evolution and associated gold mineralization of the Cadillac fault, Abitibi, Canada; *Ore Geology Reviews*, v. 82, p. 49–69.
- Couture, J.-F., Pilote, P., Machado, N. et Desrochers, J.-P. 1994. Timing of gold mineralization in the Val-d'Or district, southern Abitibi belt: evidence for two distinct mineralizing vents; *Economic Geology*, v. 89, p. 1542–1551.
- Davis, W.J., Machado, N., Gariépy, C., Sawyer, E.W. et Benn, K. 1994. U-Pb geochronology of the Opatika tonalite-gneiss belt and its relationship to the Abitibi greenstone belt, Superior province, Quebec; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 32, p. 113–127.

- De Souza, S., Dubé, B., McNicoll, V.J., Dupuis, C., Mercier-Langevin, P., Creaser, R.A. et Kjarsgaard, I.M. 2017. Geology and hydrothermal alteration of the world-class Canadian Malartic gold deposit: genesis of an Archean stockwork-disseminated gold deposit in the Abitibi Greenstone Belt, Québec; *Reviews in Economic Geology*, v. 19, p. 263–291.
- Diez Fernández, S., Sugishama, N., Ruiz Encinar, J. et Sanz-Medel, A. 2012. Triple quad ICP-MS (ICPQQQ) as a new tool for absolute quantitative proteomics and phosphoproteomics; *Analytical Chemistry*, v. 84, p. 5851–5857.
- Dimroth, E., Cousineau, P., Leduc, M. et Sanschagrin, Y. 1978. Structure and organization of Archean subaqueous basalt flows, Rouyn-Noranda area, Quebec, Canada; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 15, p. 902–918.
- Dimroth, E., Imreh, L., Goulet, N. et Rocheleau, M. 1983. Evolution of the south-central segment of the Archean Abitibi belt, Quebec, Part II: tectonic evolution and geomechanical model; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1355–1373.
- Dubé, B., Gosselin, P., Mercier-Langevin, P., Hannington, M. et Galley, A. 2007. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits; *in* *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*, (ed.) W.D. Goodfellow; Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication no. 5, p. 75–94.
- Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Ayer, J., Atkinson, B. et Monecke, T. 2017. Orogenic greenstone-hosted quartz-carbonate gold deposits of the Timmins-Porcupine camp; *Reviews in Economic Geology*, v. 19, p. 51–79.
- Farquhar, J. et Wing, B. 2003. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere; *Earth and Planetary Science Letters*, v. 213, p. 1–13.
- Gosselin, P. et Dubé, B. 2005. Gold deposits of the world: distribution, geological parameters and gold content; Geological Survey of Canada, Open File 4895, 271 p.
- Hastie, E.C.G., Kontak, D.J. et Lafrance, B. 2016. Update on activities related to a gold metallogenic study of the southern Swayze greenstone belt; *in* *Summary of Field Work and Other Activities, 2016*; Ontario Geological Survey, Open File Report 6323, p. 8-1–8-10.
- Hyde, R.S. 1980. Sedimentary facies in the Archean Timiskaming Group and their tectonic implications, Abitibi greenstone belt, northeastern Ontario, Canada; *Precambrian Research*, v. 12, p. 161–195.
- Imreh, L. 1984. Sillon de La Motte–Vassan et son avant-pays méridional: synthèse volcanologique, lithostratigraphique et gîtologique; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, report MM 82-04, 72 p.
- Jemielita, R.A., Davis, D.W. et Krogh, T.E. 1990. U-Pb evidence for Abitibi gold mineralization postdating greenstone magmatism and metamorphism; *Nature*, v. 346, p. 831–834.
- LaFlamme, C., Martin, L., Jeon, H., Reddy, S.M., Selvaraja, V., Caruso, S., Bui, T.H., Roberts, M.P., Voute, F., Hagemann, S., Wacey, D., Littman, S., Wing, B., Fiorentini, M. et Kilburn, M.R. 2016. In situ sulfur isotope analysis by SIMS of pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, and pentlandite to refine magmatic ore genetic models; *Chemical Geology*, v. 444, p. 1–15.
- LaFlamme, C., Fiorentini, M.L., Lindsay, M.D. et Bui, T.H. 2018. Atmospheric sulfur is recycled to the crystalline continental crust during supercontinent formation; *Nature Communications*, v. 9, p. 1–9.

- Latulippe, M. 1966. The relationship of mineralization to Precambrian stratigraphy in the Matagami Lake and Val-d'Or districts of Québec; Geological Association of Canada, v. 3, p. 21–42.
- Loucks, R.R. et Mavrogenes, J.A. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions; *Science*, v. 284, p. 2159–2163.
- Machado, N., Philippe, S., Gariépy, C. et David, J. 1991. Géochronologie U-Pb territoire québécois: fosses du Labrador et de l'Ungava et Sous-province du Pontiac; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 91-07, 50 p.
- Machado, N. et Gariépy, C. 1994. Géochronologie U-Pb du territoire québécois : la Sous-province de l'Abitibi, cinquième rapport intérimaire : résultats 1993–1994; Ministère des Ressources naturelles du Québec, internal report, 9 p.
- Mathur, R., Ruiz, J., Titley, S., Gibbins, S. et Margotomo, W. 2000. Different crustal sources for the Au-rich and Au-poor ores of the Grasberg Cu-Au porphyry deposit; *Earth and Planetary Science Letters*, v. 183, p. 7–14.
- Monecke, T., Mercier-Langevin, P., Dubé, B. et Friedman, B.M. 2017. Geology of the Abitibi greenstone belt; Chapter 1 in *Archean base and precious metal deposits*, (ed.) T. Monecke, P. Mercier-Langevin and B. Dubé; *Reviews in Economic Geology*, v. 19, p. 7–50.
- Morasse, S., Wasteneys, H.A., Cormier, M., Helmstaedt, H. et Mason, R. 1995. A pre-2686 Ma intrusion-related gold deposit at the Kiena mine, Val d'Or, Québec, Southern Abitibi Subprovince; *Economic Geology*, v. 90, p. 1310–1321.
- Ootes, L., Morelli, R.M., Creaser, R.A., Lentz, D.R., Falck, H. et Davis, W.J. 2011. The timing of Yellowknife gold mineralization: a temporal relationship with crustal anataxis?; *Economic Geology*, v. 106, p. 713–720.
- Petrella, L., Thébaud, N., LaFlamme, C., Miller, J., McFarlane, C., Occhipinti, S., Turner, S. et Perazzo, S. 2019. Contemporaneous formation of vein-hosted and stratabound gold mineralization at the world-class Dead Bullock Soak mining camp, Australia; *Mineralium Deposita*, 18 p.
- Piette-Lauzière, N., Guilmette, C., Bouvier, A., Perrouty, S., Pilote, P., Gaillard, N., Lypaczewski, P., Linnen, R.L. et Olivo, G.R. 2019. The timing of prograde metamorphism in the Pontiac Subprovince, Superior craton: implications for Archean geodynamics and gold mineralization; *Precambrian Research*, v. 320, p. 111–136.
- Pilote, P., Dion, C., Joannis, A., David, J., Machado, N., Kirkham, R.V. et Robert, F. 1997. Géochronologie des minéralisations d'affiliation magmatique de l'Abitibi, secteurs Chibougamau et de Troilus-Frotet : implications géotectoniques; Programme et résumés, Séminaire d'information sur la recherche géologique ; Ministère des Ressources naturelles, Québec, DV97-03, 47 p.
- Pilote, P., Moorhead, J. et Mueller, W. 1998a. Développement d'un arc volcanique, la région de Val-d'Or, ceinture de l'Abitibi—volcanologie physique et évolution métallogénique; Geological Association of Canada–Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Québec, Québec, May 1998, Fieldtrip guidebook A2, 104 p.
- Pilote, P., Mueller, W.U., Parent, M., Machado, N., Moorhead, J., Scott, C.R. et Lavoie, S. 1998b. Géologie et volcanologie des formations Val-d'Or et Héva, district de Val-d'Or, sous-province de l'Abitibi Québec: contraintes géochimique et géochronologique; Geological Association of Canada–Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Québec, Québec, May 1998,, Program with Abstracts, p. 146–47.
- Pilote, P., Mueller, W., Scott, C., Lavoie, S., Champagne, C. et Moorhead, J. 1998c. Volcanologie de la formation de Val-d'Or et du groupe de Malartic, Sous-province de l'Abitibi : contraintes géochimiques et géochronologiques; Ministère des Ressources naturelles du Québec, DV 98-05, 48 p.

- Powell, W.G., Carmichael, D.M. et Hodgson, C.J. 1995. Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 32, p. 787–805.
- Pyke, D.R., Naldrett, A.J. et Eckstrand, O.R. 1973. Archean ultramafic flows in Munro Township, Ontario; *Geological Society of America, Bulletin* 84, p. 955–978.
- Robert, F., Poulsen, K.H., Cassidy, K.F. et Hodgson, C.J. 2005. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons; *in Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume*, (ed.) J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards; *Society of Economic Geologists*, , p. 1001–1033.
- Ross, P.S., Goutier, J., Mercier-Langevin, P. et Dubé, B. 2011a. Basaltic to andesitic volcanoclastic rocks in the Blake River Group, Abitibi greenstone belt: 1. Mode of emplacement in three areas; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 48, p. 728–756.
- Ross, P.S., McNicoll, V., Goutier, J., Mercier-Langevin, P. et Dubé, B. 2011b. Basaltic to andesitic volcanoclastic rocks in the Blake River Group, Abitibi greenstone belt: 2. Origin, geochemistry and geochronology; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 48, p. 757–777.
- Scott, C.R., Mueller, W.U. et Pilote, P. 2002. Physical volcanology, stratigraphy, and litho-geochemistry of an Archean volcanic arc: evolution from plume-related volcanism to arc rifting of SE Abitibi greenstone belt, Val-d'Or, Canada; *Precambrian Research*, v. 115, p. 223–260.
- Thurston, P.C., Ayer, J.A., Goutier, J. et Hamilton, M.A. 2008. Depositional gaps in the Abitibi greenstone belt stratigraphy: a key to exploration for syngenetic mineralization; *Economic Geology*, v. 103, p. 1097–1134.
- Wilkinson, L., Cruden, A.R. et Krogh, T.E. 1999. Timing and kinematics of post-Timiskaming deformation within the Larder Lake-Cadillac deformation zone, southwest Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 36, p. 627–647.
- Wong, L., Davis, D.W., Krogh, T.E. et Robert, F. 1991. U-Pb zircon and rutile chronology of Archean greenstone formation and gold mineralization in the Val-d'Or region, Quebec; *Earth and Planetary Science Letters*, v. 104, p. 325–336.
- Zweng, P.L., Mortensen, J.K. et Dalrymple, G.B. 1993. Thermochronology of the Camflo gold deposit, Malartic, Quebec: implications for magmatic underplating and the formation of gold-bearing quartz veins; *Economic Geology*, v. 88, p. 1700–1721.

FIGURES

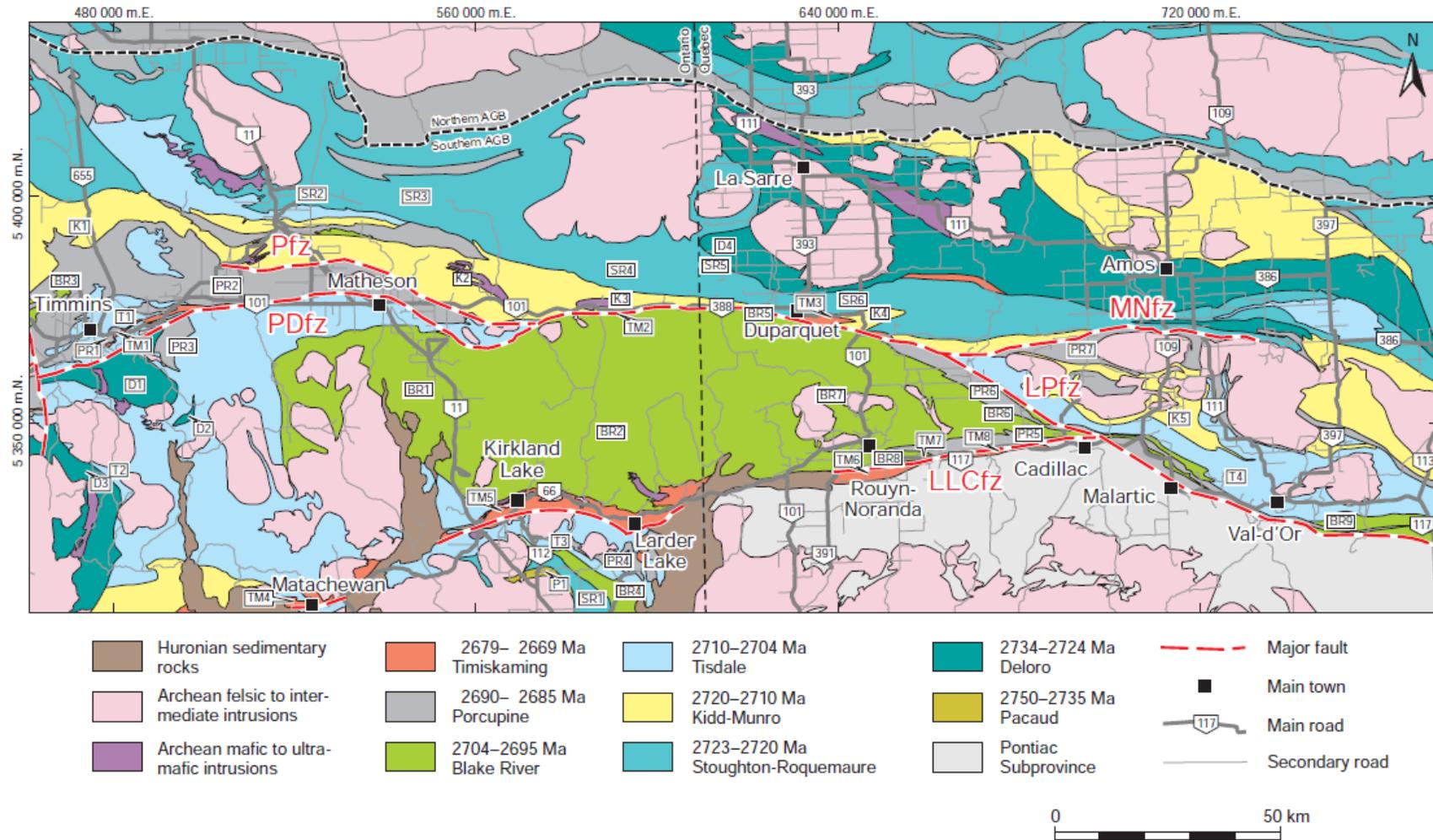


Figure 1. Géologie de la partie sud de la ceinture de roches vertes de l’Abitibi montrant l’emplacement des échantillons recueillis en 2019 et les principaux assemblages chronostratigraphiques qui correspondent à des périodes volcaniques et sédimentaires distinctes survenues au cours de la formation de la Sous-province d’Abitibi. Gîtes : Canadian Malartic (I); Goldex (II); Triangle (III); Pascalis Gold Trend (IV). Figure *modifiée de* Monecke et al. (2017). Abréviations: AGB, ceinture de roches vertes de l’Abitibi; LLCFZ, zone de failles de Larder Lake–Cadillac; LPFZ, zone de failles de La Pause; MNFZ, zone de failles de Manneville-Nord; PDFZ, zone de failles de Porcupine–Destor.

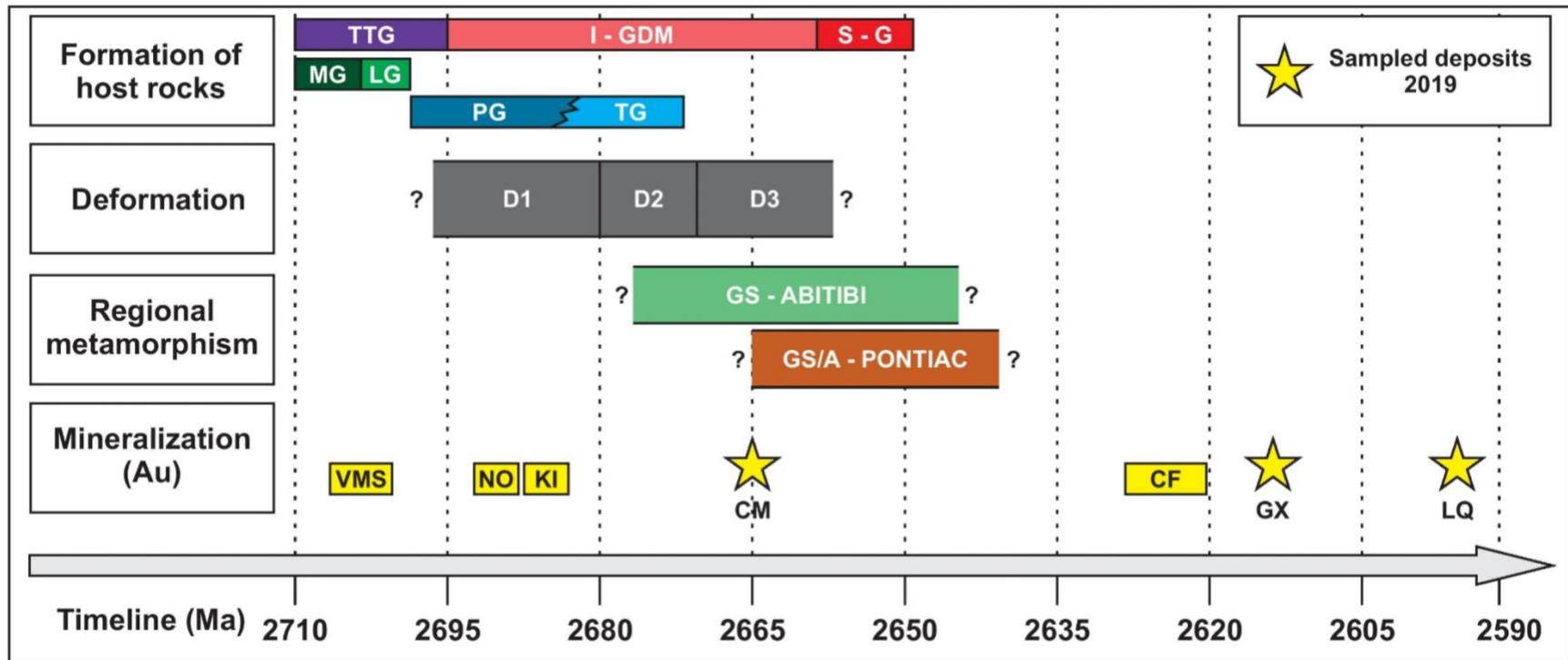


Figure 2. Chronologie simplifiée montrant les principaux épisodes géologiques à l'origine de la formation de la région de Malartic–Val-d'Or et de la minéralisation aurifère connexe. Sources : gîte de Camflo (CF), Jemielita et al. (1990), Zweng et al. (1993); gîte de Canadian Malartic (CM), De Souza et al. (2017); déformations (D1, D2, D3), Wilkinson et al. (1999), Bedeaux et al. (2017); roches vertes de l'Abitibi (GS), Powell et al. (1995); roches vertes et amphibolite de Pontiac (GS/A), Machado et al. (1991), Davis et al. (1994), Powell et al. (1995), Piette-Lauzière et al. (2019); gîte de Goldex (GX), Commission géologique du Canada (données non publiées); granodiorite, diorite, monzonite de type I (I-GDM), Beakhouse (2011); gîte de Kiena (KI), Morasse et al. (1995); groupe de Louvicourt (GL), Pilote et al. (1998a); gîte de Lamaque (LQ), Wong et al. (1991); groupe de Malartic (MG), Pilote et al. (1997), Scott et al. (2002); gîte de Nolartic (NO), Couture et al. (1994); granite local de type S (S-G), Beakhouse (2011); tonalite, trondhjémite, granodiorite (TTG), Beakhouse (2011).



Figure 3. L'affleurement principal au gîte de Pascalis Gold Trend faisant face à l'ouest. De minces filonnets de sulfure et de quartz de taille millimétrique (V0_{PGT}) à l'apparence de minéraux sulfurés rouillés subparallèles à S_0 dont le pendage est orienté vers le nord (et subparallèle au stylo en tungstène) dans une unité basaltique montrant un filon transversal tardif à profil aplati de quartz et de tourmaline qui affiche une salbande rouillée en raison de l'altération météorique des minéraux sulfurés et de la tourmaline.