

Pétrologie métamorphique et géologie structurale du nord-est de la Sous-province de Pontiac : interprétations préliminaires

Nicolas Piette-Lauzière et Carl Guilmette

MB 2017-05



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.

Pétrologie métamorphique et géologie structurale du
nord-est de la Sous-province de Pontiac :
interprétations préliminaires

par

Nicolas Piette-Lauzière et Carl Guilmette

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

Avril 2017

Résumé

La Sous-province métasédimentaire de Pontiac est située au sud de la Sous-province de l'Abitibi, au sein de la Province archéenne du Supérieur. La juxtaposition des deux sous-provinces est généralement interprétée comme le résultat d'un processus de subduction. Ce contexte tectonique serait à première vue compatible avec un métamorphisme de type barrovien (métamorphisme de moyennes pression et température) caractérisé par l'assemblage biotite-muscovite-grenat-staurotide-kyanite-sillimanite typique du Pontiac. Toutefois, les domaines de stabilité déterminés pour les roches métapélitiques qui présentent des assemblages comprenant la staurotide ne sont pas compatibles avec le gradient métamorphique typique des zones de subduction.

Ce rapport présente des observations pétrographiques et structurales dans le but de répondre à cette problématique. Quatre familles de structures influencent à divers degrés le développement des assemblages métamorphiques régionaux : la stratification (S_0), la foliation principale (S_1), le clivage de crénulation (Q_2) et les kink bands (Q_3). La foliation principale consiste en un alignement discontinu à continu des paillettes de biotite et de muscovite qui se manifeste dans les zones de bas grade métamorphique par un clivage de pression-dissolution. Son orientation générale est E-W avec un pendage vertical. Au nord du Pontiac, la matrice quartzofeldspathique hétérogène est composée de cristaux xénomorphes. Elle passe vers le sud à une microstructure granoblastique liée à la recristallisation et à l'augmentation du grade métamorphique. La formation du grenat, de la staurotide, de la kyanite et de la sillimanite est tardive par rapport à la foliation principale. Le clivage de crénulation Q_2 , d'amplitude millimétrique, est associé à la cristallisation de biotite et de muscovite et se superpose à la foliation principale. Les travaux futurs viseront à valider les observations pétrographiques grâce à des analyses la microsonde, à produire des modélisations thermobarométriques des conditions P-T du paroxysme métamorphique et à réaliser la datation des grenats par la méthode Lu-Hf.

Mots clefs : Pontiac, Métamorphisme, Canadian Malartic, Minéralisation aurifère, Kyanite, Staurotide, Grenat.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Localisation et nature des travaux	2
3. Contexte géologique et travaux antérieurs	3
3.1 Travaux historiques.....	3
3.2 Travaux récents	7
3.3 Datations clefs.....	10
4. Exposé théorique du problème et méthodologie	12
4.1 Stratégie d'échantillonnage.....	14
5. Observations	15
5.1 Étendue et représentativité de l'échantillonnage.....	15
5.2 Description macroscopique des lithologies et des fabriques structurales	16
5.3 Description microscopique des lithologies et des fabriques structurales.	24
5.3.1 Zone à biotite-muscovite-chlorite	24
5.3.2 Zone à biotite-chlorite-muscovite-grenat.....	27
5.3.3 Zone à biotite-chlorite-muscovite-grenat-staurotide.....	27
5.3.4 Zone à biotite-muscovite-grenat-staurotide-kyanite	28
5.4 Autres minéraux métamorphiques	28
6. Interprétation	34
6.1 Modèle structural et métamorphique combiné.....	34
6.2 Comparaison avec les travaux antérieurs.....	39
7. Conclusions et travaux futurs	41
8. Références	42

1. Introduction

La Sous-province de Pontiac est située dans le craton archéen du Supérieur. Elle est prise en étau entre la Sous-province de l'Abitibi, au nord, et le front tectonique du Grenville au sud et à l'est (Figure 1). Le contact ouest de la Sous-province de Pontiac avec le Groupe de Larder-Lake est masqué par le couvert de roches sédimentaires protérozoïques du Groupe de Cobalt et il a été suggéré, sur la base de données gravimétriques, que le contact entre ces deux unités soit faillé (Kalliokoski, 1986). Ainsi, par son faciès lithologique distinctif, son grade métamorphique en apparence contrasté et ses contacts faillés avec les provinces et sous-provinces géologiques adjacentes, la Sous-province de Pontiac est considérée comme ayant les attributs d'un « terrane » archéen d'après la définition de Schermere *et al.* (1984). Pourtant, il est communément accepté sur la base d'observations géologiques, structurales et pétrologiques que cette sous-province consiste en un bassin sédimentaire associé à une zone de subduction (Dimroth *et al.*, 1983, Camiré et Burg, 1993). Dans le contexte où une partie de la communauté scientifique se questionne sur l'existence même du mécanisme de subduction à l'Archéen (Dimroth *et al.* 1983; Bédard *et al.*, 2013), et qu'un type de minéralisation aurifère atypique a été identifié à proximité de la suture nord de la Sous-province de Pontiac (mine Canadian Malartic), il est important de développer notre compréhension de la tectonique archéenne en employant le métamorphisme comme outil permettant de générer des données quantitatives. Dans cette optique, seule la portion nord-ouest de Pontiac (le sud du secteur de Rouyn-Noranda) a été documentée de façon régionale (Goulet, 1978; Camiré, 1991; Ghassemi, 1996) alors que le nord-est (le sud du secteur Malartic-Val-d'Or) de la sous-province, comprenant la minéralisation de la mine Canadian Malartic, a été peu documenté. Dans le cadre de ce projet, une campagne de terrain a été menée à l'été 2014 sous la supervision de Pierre Pilote (MERN) en collaboration avec Stéphane Perrouy (Université Western, Ontario) dans la portion nord-est de la Sous-province de Pontiac. Le secteur étudié est délimité par les villes de Malartic à l'ouest, Val-d'Or au nord-est, la faille de Cadillac-Larder-Lake au nord, et le batholite de Decelles au sud (Figures 1 et 2). Ce rapport contient un résumé des observations de terrain et des lames minces ainsi qu'une interprétation structurale et métamorphique préliminaire. Une attention particulière sera accordée aux principaux épisodes de déformation, à la pétrologie métamorphique, ainsi qu'aux relations entre les

minéraux métamorphiques et les épisodes de déformation. Ces observations seront ensuite mises en contexte avec les travaux historiques effectués dans la Sous-province de Pontiac.

2. Localisation et nature des travaux

Les travaux ont été effectués à l'été 2014 sous la supervision de Pierre Pilote sur les feuillets SNRC 32C04 et 32D01 au sud des villes de Malartic et de Val-d'Or (Figures 1 et 2). Les travaux effectués consistent en une description des structures macroscopiques, de la pétrologie métamorphique et d'un échantillonnage systématique des affleurements visités durant la campagne de terrain. Soixante lames minces polies ont été préparées à partir de ces échantillons. La minéralogie et les structures observées en lame mince ont été décrites dans le cadre du projet de maîtrise de l'auteur principal du présent rapport.

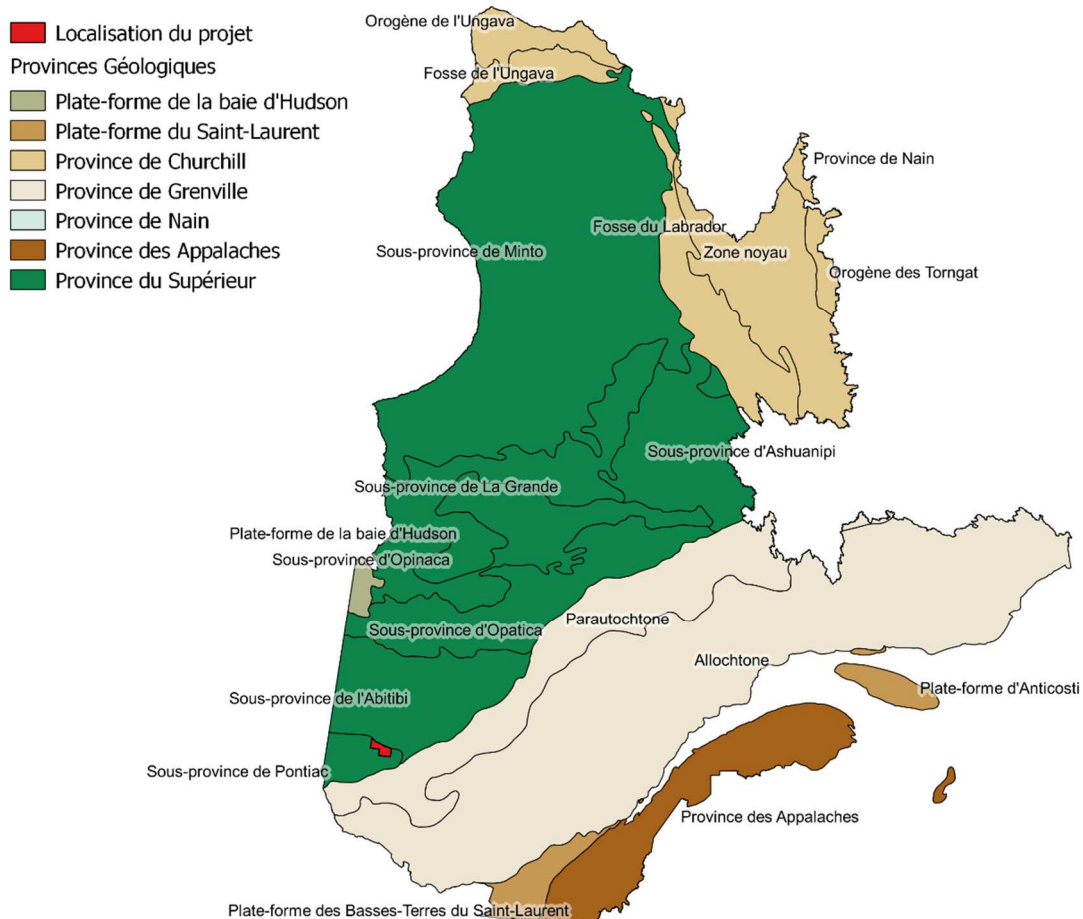


Figure 1 : Localisation du projet et de la Sous-province de Pontiac au sein des provinces géologiques du Québec (modifiée d'une compilation du MERN, 2011)

3. Contexte géologique et travaux antérieurs

De nombreuses hypothèses ont été proposées sur la source, le milieu de déposition, le style structural et la nature du métamorphisme de la Sous-province de Pontiac. La revue de la littérature sera divisée entre les travaux historiques, travaux récents et une compilation des datations clefs. Les travaux historiques sont abordés de façon à illustrer la contribution des auteurs qui ont façonné la vision actuelle de l'origine et du contexte tectonique de formation de la Sous-province de Pontiac. Les travaux récents sont présentés de façon à présenter les interprétations tectono-métamorphiques qu'ils véhiculent et les observations sur lesquelles elles ont été formulées.

3.1 Travaux historiques

Suite aux descriptions et à la compilation des plans de la mine Canadian Malartic faite par O'Neil (1935) et Derry (1936), Gunning et Ambrose ont produit en 1943 une description systématique de la minéralisation aurifère du camp minier de Val-d'Or et de Malartic ainsi que des mines Canadian Malartic, Sladen Malartic et East-Malartic, formant aujourd'hui le gisement Canadian Malartic. Sur la base de la minéralogie de la minéralisation, ils ont identifié le caractère distinctif de ces gisements de ceux associés à la faille de Cadillac. Ils soulignent en outre le contrôle structural de la mise en place des intrusions de « porphyres acides » à la mine d'East-Malartic et des fluides « de remplacement » aux mines Canadian Malartic et Sladen Malartic. Gunning et Ambrose (1943) ont aussi noté la présence de grenats dans les grauwackes de la Sous-province de Pontiac et l'ont attribué à un processus de métamorphisme de contact. Le Pontiac était alors interprété comme le flanc sud d'un synclinal régional dont le Groupe de Kewagama aurait formé la contrepartie nord.

Holubec (1963) souligne le caractère bien trié des roches sédimentaires de Pontiac et leur granulométrie diminuant apparemment vers le nord. Sur la base de la polarité nord des roches sédimentaires et la diminution de granulométrie, il attribue ces roches sédimentaires à un dépôt de piedmont provenant de l'érosion d'une source situé au sud. Le métamorphisme n'est alors pas envisagé comme mécanisme expliquant l'augmentation apparente de la granulométrie vers le sud de la Sous-province de Pontiac.

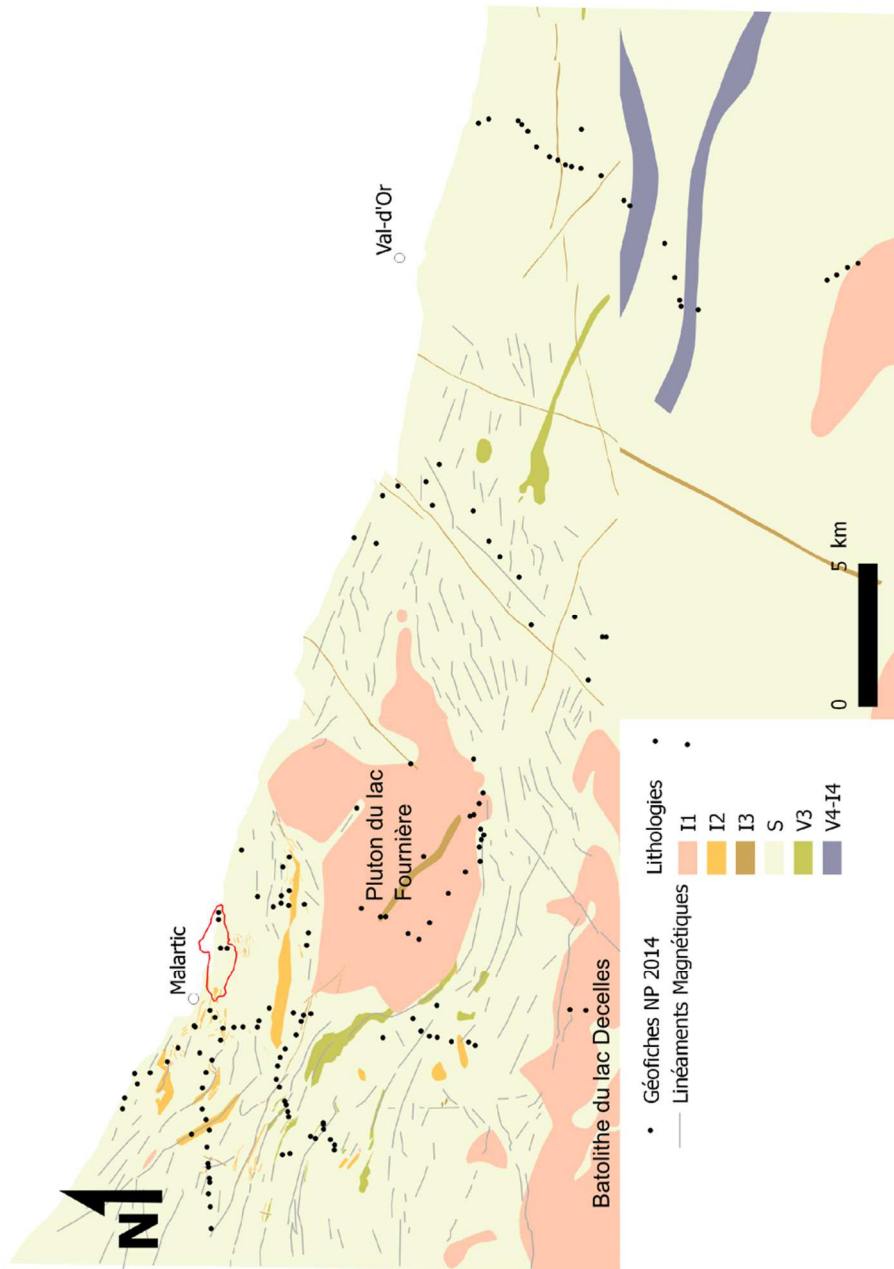
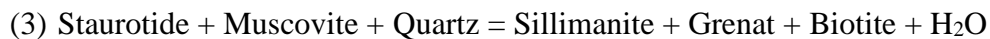
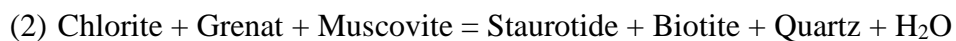
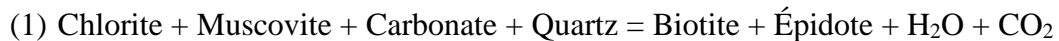


Figure 2 : Carte géologique du secteur à l'étude (modifiée de Imreh, 1984; Desrochers et al., 1996; Pilote et al., 2013 et références citées) avec le contour de la fosse de la mine Canadian Malartic datant de 2013 (rouge). La trajectoire de la schistosité principale a été interprétée à partir d'un levé magnétique aéroporté réalisé par le MERN (D'Amours et Intissar, 2012). Les positions des affleurements visités à l'été 2014 sont indiquées.

La première étude sur le métamorphisme de la Sous-province de Pontiac est effectuée par Jolly (1976) qui divise cette sous-province en quatre zones métamorphiques correspondant à des assemblages minéralogiques distincts. Ces zones, aux frontières E-O, sont caractérisées, du nord vers le sud, par la biotite, le grenat plus hornblende, staurotide et kyanite. Powell et al. (1995) interprètent un métamorphisme régional syntectonique prenant place entre 2677 et 2643 Ma.

Lors de ses travaux de thèse doctorale localisés dans la partie nord-ouest de la Sous-province de Pontiac (secteur Rouyn-Noranda), Goulet (1978) a également reconnu l'augmentation du grade métamorphique du nord au sud. En plus d'identifier certains minéraux métamorphiques caractéristiques (biotite, grenat, staurotide, sillimanite) il a cartographié deux isogrades réactionnels correspondant aux réactions suivantes et identifié un troisième isograde en les positionnant géographiquement sur une carte :



Au niveau de la géologie structurale, il a identifié deux épisodes de plissement : le premier de plan axial nord-sud ainsi qu'un second est-ouest responsable du grain structural régional. De ce fait, deux schistosités régionales ont été interprétées dans la Sous-province de Pontiac dans le secteur Rouyn-Noranda par Goulet. La foliation S_1 est uniforme alors que S_2 est plus intense à proximité de la faille de Cadillac et est associée au plissement isoclinal de deuxième génération. Par opposition à Holubec (1963), il positionne la source des roches sédimentaires de Pontiac au nord mais prône le même type de milieu de déposition.

Lajoie et Ludden (1984) ont proposé, sur la base de la pétrologie et du patron d'éléments des terres-rares, que les roches sédimentaires de Pontiac ne sont pas équivalentes aux groupes de Timiskaming ou de Kewagama. Ils ont déterminé trois types de sources situées au nord de la sous-province lors de sa formation et ont suggéré un milieu de déposition de type marge continentale passive pour expliquer le mode détritique dominé par le quartz, par opposition à l'érosion d'un « terrane » volcanique. Rocheleau et Dimroth (1985) ont

toutefois souligné que l'estimation de la proportion de quartz dans les roches sédimentaires de Pontiac avait été biaisée par la méthodologie employée par Lajoie et Ludden puisqu'elle ne prenait pas en compte la recristallisation métamorphique. Ils ont de plus identifié une source commune possible pour les roches sédimentaires de Pontiac, Kewagama et Timiskaming au sein de la Sous-province de l'Abitibi.

Lors de la subdivision de la Province du Supérieur en Sous-provinces par Card et Ciesielski en 1986, il existait deux points de vue opposés sur l'origine de Pontiac véhiculés dans certains articles de synthèse. Tel que souligné par Dimroth *et al.* (1983), le contexte tectonique de formation du craton du Supérieur est sujet à débat opposant alors les partisans de la subduction (Dimroth *et al.*, 1983) et ceux de la tectonique verticale (Goodwin, 1977; Jolly, 1978). Dimroth *et al.* (1983) abordent directement la problématique du contact entre la Sous-province de Pontiac et de l'Abitibi et proposent un modèle tectonique de subduction au sud de la Sous-province de Pontiac. Cette dernière entraînant la formation d'un arc océanique peu profond alimentant le bassin sédimentaire en matériel de granulométrie fine. La granulométrie des sédiments devenant de plus en plus grossier vers le sud en réponse à l'exhumation de l'arc au niveau de la faille de Cadillac actuelle. De façon opposée, Jolly (1978) invoque les contacts faillés, le contraste de gradient métamorphique et l'aspect indépendant du métamorphisme affectant l'arc volcanique de l'Abitibi et les « schistes du Pontiac » pour proposer une origine plus ancienne des « schistes de Pontiac » par rapport à l'arc volcanique de l'Abitibi. De plus il invoque un mécanisme de tectonique verticale généré par la différence de densité des corps géologiques pour expliquer la subsidence des roches volcaniques et l'émergence de plutons durant l'orogénèse kénoréenne.

Dimroth *et al.* (1983) considéraient le Pontiac comme un bassin sédimentaire développé en marge de la Sous-province de l'Abitibi puis tectoniquement déformé, alors que Jolly (1978) soutenait que la Sous-province de Pontiac était antérieure au volcanisme de la Sous-province de l'Abitibi puis tectoniquement accolé par un mécanisme de diapirisme. Cette seconde interprétation, en partie basée sur l'hypothèse que les contacts du Pontiac avec les unités géologiques encaissantes étaient faillés, fut supportée par les travaux de Kalliokoski (1986) soutenant à l'aide de l'interprétation d'un levé gravimétrique que la frontière ouest de la Sous-province de Pontiac, masquée par les roches sédimentaires du Groupe de Cobalt,

est de nature faillée. Des deux interprétations, Card et Ciesielski ont retenu la seconde et ont défini le Pontiac comme une Sous-province distincte sur le critère du contraste de faciès métamorphique de part et d'autre de la faille de Cadillac. Ils soulignent toutefois que l'absence de datation représente la plus grande lacune de cette classification.

3.2 Travaux récents

Dans le cadre de travaux de doctorat, Sansfaçon (1986) et Sansfaçon et Hubert (1990) ont étudié la géologie de la propriété minière Canadian Malartic et ont contribué à la compréhension de la géologie structurale du canton de Fournière. Sur cette propriété, ils ont reconnu deux foliations distinctes. La première, associée à l'épisode de déformation D_1 est d'orientation NE-SO et est observable localement dans l'actuelle zone Gouldie de la propriété Canadian Malartic. La seconde est associée à une schistosité pénétrative S_2 d'orientation NO-SE subverticale associée à des plis d'entraînement sénestres à axes plongeant à 60 degrés vers l'ouest. En troisième lieu ils reconnaissent des plis de types « kink bands » associés à un épisode de déformation postérieur à D_2 . Ils mentionnent aussi la présence de grenat et de staurotide au sein des roches sédimentaires à moins de 1,7 km du puit historique numéro 2 de Canadian Malartic.

De Souza *et al.* (2015) ont pris en compte les travaux de Sansfaçon (1986) et de Sansfaçon et Hubert (1990) pour élucider le modèle métallogénique du gisement. Ils se sont aussi attardés à la géologie structurale de la propriété minière. De ce fait, ils soutiennent les observations de Sansfaçon sur la présence de deux fabriques planaires importantes. La foliation S_1 est parallèle au litage des roches sédimentaires, d'orientation NE, et que la schistosité S_2 représente la fabrique dominante de plan axiale aux plis P_2 . Les plis P_2 sont ouverts à fermés et plongent fortement vers l'est.

Le projet Lithoprobe (1990-1991) a stimulé la recherche dans la Sous-province de Pontiac en fournissant une base géophysiques sur laquelle asseoir les interprétations structurales. Le levé effectué au sud de Rouyn-Noranda (Ludden *et al.*, 1993) partage le même terrain que les travaux subséquents portant sur la géologie structurale, le métamorphisme et la chimie des roches sédimentaires effectués par Camiré (1993) et Ghassemi (1996). De ces travaux découlent les articles de Camiré et Burg (1993) et de Benn *et al.* (1993) dont les principales interprétations sont peu compatibles.

Camiré *et al.* (1993) proposent un modèle à deux nappes de style structural distinct, séparées par l'isograde d'apparition du staurotide. La première nappe, au nord, correspond de façon uniforme à l'isograde biotite et grenat et possède les deux phases de plissement suggérées par Goulet (1978). Dans cette nappe, la foliation principale correspond à S_1 et est marquée par l'alignement de la muscovite, biotite et de la première génération de chlorite. D_2 entraîne dans cette nappe un clivage de crénulation E-O bien défini. La seconde nappe est située dans le champ de stabilité du staurotide et de la kyanite. À l'opposé de la première nappe, la seconde ne présente pas d'évidence de plissement. L'unique foliation y est interprétée comme S_1 et les auteurs avancent qu'il est improbable que S_2 y soit dominante au point d'effacer S_1 puisque dans la première nappe S_2 est associé à un clivage rétrograde. En somme, le modèle structural invoqué pour expliquer ces structures consiste en un chevauchement vers le sud des roches sédimentaires de Pontiac lors de D_2 de façon contemporaine à un refroidissement induisant un cloisonnement de la déformation (« *deformation partitionning* ») dans la nappe du nord. L'hydratation de la nappe nord lors de D_2 serait la source des minéraux rétrogrades appartenant au clivage de crénulation S_2 . Les auteurs soulignent aussi la continuité structurale et métamorphique entre la nappe nord et les séquences volcaniques adjacentes appartenant à la Sous-province de l'Abitibi. De plus, ils qualifient d'improbable la mise en place du Pontiac dans un contexte de bassin d'arrière-arc ou de bassin marginal puisqu'il n'y a pas de magmatisme extensionnel synchrone associé. Ils considèrent également que l'aspect monotone et le faciès profond des turbidites est contradictoire avec l'hypothèse d'un bassin en décrochement. Finalement, ils favorisent une hypothèse de collision de type plaque tectonique pour expliquer la courte durée de la sédimentation et de la déformation, qu'ils estiment à 10 Ma, ainsi que la présence de magma d'affinité avec une zone de subduction mis en place avant le pic du métamorphisme. Cette interprétation est donc cohérente avec le modèle du prisme d'accrétion soutenu par Dimroth *et al.* (1983).

Benn *et al.* (1993) ne reconnaissent pas l'existence de deux nappes dans la partie nord-ouest de Pontiac et invoquent un métamorphisme en apparence continu et une répartition régionale de l'observation des structures de D_1 à D_3 pour justifier leur interprétation contrastée avec celle de Camiré et Burg (1993). Ils notent que S_1 forme la foliation principale associée à des plis isoclinaux, alors que D_2 entraîne un plissement asymétrique

à vergence sud-est et un clivage de crénulation de plan axial. Des traces d'inclusions sigmoïdales appartenant à S_1 au sein des staurotides indiquent que le pic du métamorphisme a eu lieu lors de D_2 . Un épisode D_3 de moindre importance entraîne une crénulation des structures planaires antérieures et la formation de plis et de zones de cisaillement sénestres à fort pendage vers le nord-ouest. Dans la thèse de Ghassemi (1996), co-auteur du papier précédent, quatre isogrades d'apparition de minéraux métamorphiques sont définis (grenat, staurotide, kyanite et sillimanite) ainsi que les conditions du pic métamorphique, calculé à 620°C et 7,2 kbar. Le modèle tectonique suggéré par Ghassemi (1996) correspond à une déposition des sédiments du Pontiac dans un bassin d'arrière-arc lors du rift du système d'arc volcanique de l'Abitibi le long d'une discontinuité ayant évolué pour devenir la faille de Cadillac (2700 à 2690 Ma). Par la suite, la collision d'un terrane océanique ou continental avec le segment sud de l'arc volcanique vers 2680 Ma aurait entraîné la fermeture du bassin. Cela aurait provoqué la collision entre l'arc, le bassin sédimentaire et le « terrane » puis un épaissement de la croûte synchrone à la mise en place des granites de type I. Lors de cet événement, vers 2670 Ma, le métamorphisme régional aurait été à son paroxysme durant la formation des structures profondes de nappes de chevauchement, contribuant à l'épaississement crustal (D_1). Finalement une nouvelle contraction de la croûte vers 2626-2529 Ma aurait créé les structures de D_2 . Depuis 2500 Ma, le développement d'une marge passive au sud du craton du Supérieur aurait entraîné le développement de failles normales contribuant à la formation de demi-grabens dans lequel le groupe de Cobalt se serait déposé. Puis, entre 1.9 et 1.7 Ga, l'orogénèse Pénokéenne serait à l'origine de la formation des structures D_3 .

Les modèles structuraux de Camiré et Burg (1993) versus Benn *et al.* (1993) et Ghassemi (1996) sont difficilement réconciliables. Benn *et al.* ont repéré l'isograde d'apparition du staurotide et de la kyanite plus au nord que la frontière des nappes suggérées par Camiré. De plus, ils prétendent à une répartition régionale des structures appartenant à D_1 et D_2 . Sur cette base ils ne supportent pas la division en nappes distinctes de la Sous-province de Pontiac avancée par Camiré et Burg. De plus le pic métamorphique serait synchrone à D_1 selon Camiré et Burg alors qu'il serait synchrone à D_2 d'après Benn *et al.* (1993). L'interprétation commune entre ces auteurs est que la foliation S_1 , d'envergure régionale, est associée au plan axial de plis isoclinaux alors que S_2 correspond à un clivage de

crénulation parfois faible, parfois intense, de plan axial à des plis asymétriques de vergence sud.

3.3 Datations clefs

Gariépy *et al.* (1984) ont déterminé l'âge des roches sources de la Sous-province de Pontiac à partir de 26 zircons détritiques. D'après la distribution des âges de ces zircons, ils ont définis deux populations. La plus jeune, datée entre 2725 et 2700 Ma, correspondrait vraisemblablement à des roches ignées felsiques contemporaines provenant de la Sous-province de l'Abitibi. La plus vieille, âgée d'au moins 2940 Ma faisant partie d'un bassin sédimentaire émergé ou d'un socle sialique plus ancien que l'Abitibi. Davis (2002) obtient des résultats similaires et corrobore l'interprétation des deux familles de zircon détritiques de Gariépy *et al.* et précise un âge minimal en datant le pluton du lac Fournière, recoupant la Sous-province de Pontiac, à 2682 ± 2 Ma ainsi qu'en obtenant un zircon détritique de 2685 Ma.

Le batholite de Decelles, mise en place dans la Sous-province de Pontiac, représente une certaine difficulté au niveau des datations isotopiques, considérant sa très vaste envergure et la grande variabilité des faciès intrusifs rencontrés (Rive *et al.*, 1990; Machado *et al.*, 1991a). Considérant ces difficultés, Machado *et al.* (1991b) ont analysé quatre monazites provenant du monzogranite de l'intrusion de Hallé, constituant une phase distinctive du batholite de Decelles. Ces cristaux ont livré un âge identique de 2651 ± 2 Ma, ce qui représente la meilleure estimation pour dater la cristallisation de l'intrusion de Hallé. Un âge de 2658 ± 2 Ma a également été obtenu pour la monazite provenant d'un granite à muscovite du batholite de Decelles (Machado *et al.*, 1991b). Mortensen et Card (1993) ont également daté une monazite provenant d'un échantillon de granite pegmatitique prélevé au sud du lac Caron dans le batholite de Decelles. Considérant la température élevée de fermeture de la monazite (720°C) par rapport à la température de mise en place de ce type d'intrusion, les auteurs ont obtenu un âge de 2668 Ma, qu'ils estiment représentatif de la mise en place d'une partie de ce batholite. De leur côté, Powell *et al.* (1995) ont employé la méthode de datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur la muscovite d'une enclave de roche sédimentaire de Pontiac contenue au sein de ce batholite pour déterminer l'âge de la fin de la cristallisation, celle-ci correspondant idéalement à la température de fermeture du système isotopique de

la muscovite à 300°C. Ils ont obtenu 2518±6 Ma, ce qui indiquerait une durée de 150 Ma, à partir de son emplacement jusqu'à l'atteinte de cette température.

Plusieurs auteurs ont tenté de dater les épisodes métamorphiques du Pontiac à l'aide de l'U/Pb sur la titanite et les amphiboles des corps intrusifs métamorphisés, ainsi que par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur la biotite et la muscovite métamorphique. Feng *et al.* (1992) ont déterminé deux événements thermiques en combinant ces techniques soit 2690-2670 Ma et 2660 et 2630 Ma sur des échantillons considérés représentatifs à l'échelle régionale. Machado *et al.* (1991c) ont obtenu un âge de 2663±4 Ma pour la titanite d'une intrusion tonalitique métamorphisée (orthogneiss du lac Opasatica) et l'ont interprété comme correspondant au premier événement métamorphique de la Sous-province de Pontiac. Cet âge est toutefois concordant avec le second événement métamorphique interprété par Feng *et al.* (1992). Powell *et al.* (1995) ont complété l'interprétation de Feng *et al.* (1992) sur la durée du refroidissement suivant le second pic métamorphique à l'aide de la muscovite et de la biotite prélevée dans la zone à staurotide. Ils ont obtenu respectivement un âge de fermeture de 2578±6 et 2532±7 Ma qu'ils interprètent comme étant prolongé par l'apport thermique du Batholite de Decelles. Finalement, le premier épisode de déformation affectant le Pontiac serait syn-Timiskaming selon Robert (2001), i.e de 2687 à 2680 Ma (Corfu *et al.*, 1991). Toujours selon Robert (2001), le second épisode de déformation peut être daté indirectement par les intrusions non déformées à 2660 Ma.

La figure 3 présente un résumé des datations présentées dans cette section. Cette figure exprime une bonne corrélation entre les épisodes de déformation définis par Robert (2001) avec les événements de métamorphisme définis par Feng *et al.* (1992) et Machado *et al.* (1991c).

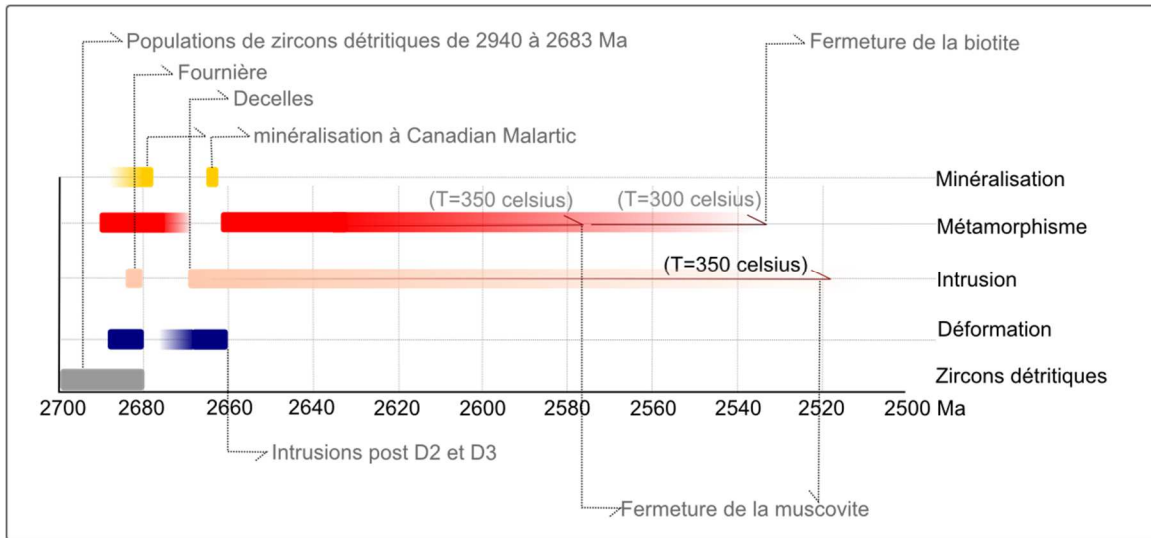


Figure 3 : Principales datations directes et indirectes effectuées dans la Sous-province du Pontiac. Les données proviennent de Gariépy *et al.* (1984), Machado *et al.* (1991b, 1991c), Feng *et al.* (1992), Mortensen et Card (1993), Powell *et al.* (1995), Robert (2001), Davis (2002) et De Souza *et al.* (2015).

4. Exposé théorique du problème et méthodologie

Deux problématiques complémentaires sont soulevées dans le projet. Tout d’abord, tel que souligné par Camiré (1993), il n’existe pas de consensus sur la tectonique archéenne. Des modèles géodynamiques modernes sont actuellement employés pour décrire les phénomènes observés dans la Sous-province de Pontiac et dans le craton archéen en général. De ce fait, les assemblages métamorphiques de type barrovien que l’on retrouve dans la Sous-province de Pontiac ont été employés pour proposer un contexte géodynamique de zone de subduction. Pourtant, ces assemblages peuvent être formés à des conditions de température et de pression variées tel qu’illustrées à la figure 4. Il est donc essentiel d’aborder cette problématique d’un point de vue quantitatif en effectuant une modélisation thermo-barométrique systématique en vue de définir le gradient métamorphique. Ces données pourront être employées pour proposer un environnement géodynamique en effectuant une comparaison directe avec le gradient métamorphique des contextes modernes d’accrétion.

En second lieu, la Sous-province de Pontiac possède un potentiel aurifère confirmé à sa frontière nord, tel qu’illustré par le gisement Canadian Malartic, situé dans la zone métamorphique des schistes verts (Eakins, 1962; Trudel et Sauvé, 1992; Fallara et al.,

2000). Les relations temporelles entre le métamorphisme, la minéralisation aurifère et la déformation régionale doivent être identifiées pour promouvoir l'exploration de gisements similaires dans la Sous-province de Pontiac ou ailleurs, dans des zones de plus haut grade métamorphique. Dans cette optique, aucuns minéraux métamorphiques de haut grade (grenat, staurotide, kyanite ou sillimanite) n'ont été observés en relation avec la minéralisation dans l'enceinte de la mine de Canadian Malartic. Il n'est donc pas possible de démontrer de façon directe le lien temporel entre la minéralisation et le métamorphisme à partir des relations texturales. Tablant sur les travaux descriptifs antérieurs (par exemple Sanfaçon et Hubert, 1990), De Souza *et al.* (2015) ont lié de façon texturale les épisodes de minéralisation avec la foliation principale, nommée S_2 , identifiée localement dans la mine Canadian Malartic. Ils ont démontré que le premier épisode de minéralisation associé à des intrusions de monzonite et monzonite quartzifère a une signature hydrothermale syn-Timiscaming (<2678 Ma) et qu'un second épisode de minéralisation ou de remobilisation est synchrone à la foliation principale. Ainsi, un modèle structural robuste doit être établi afin d'identifier à l'échelle régionale la foliation correspondant à S_2 observée à l'échelle de la mine. Il sera alors possible d'y lier les épisodes de croissances des minéraux métamorphiques et de définir indirectement la relation temporelle entre le métamorphisme, la déformation et la minéralisation au gîte Canadian Malartic. De plus, la datation des grenats par la méthode Lu-Hf, permettra de comparer de façon absolue l'âge du pic métamorphique avec l'âge de la minéralisation défini par De Souza *et al.* (2015). Dans ce rapport, les affleurements propices à effectuer la datation des grenats sont repérés en fonction des critères suivants : le site doit comprendre un assemblage de minéraux métamorphique varié afin de contraindre adéquatement les conditions de pression et de température du pic métamorphique, une concentration de grenat suffisante pour en extraire un concentré et doit être situé à proximité de la mine. Les résultats de ces datations seront présentés dans un mémoire de maîtrise à venir à l'Université Laval.

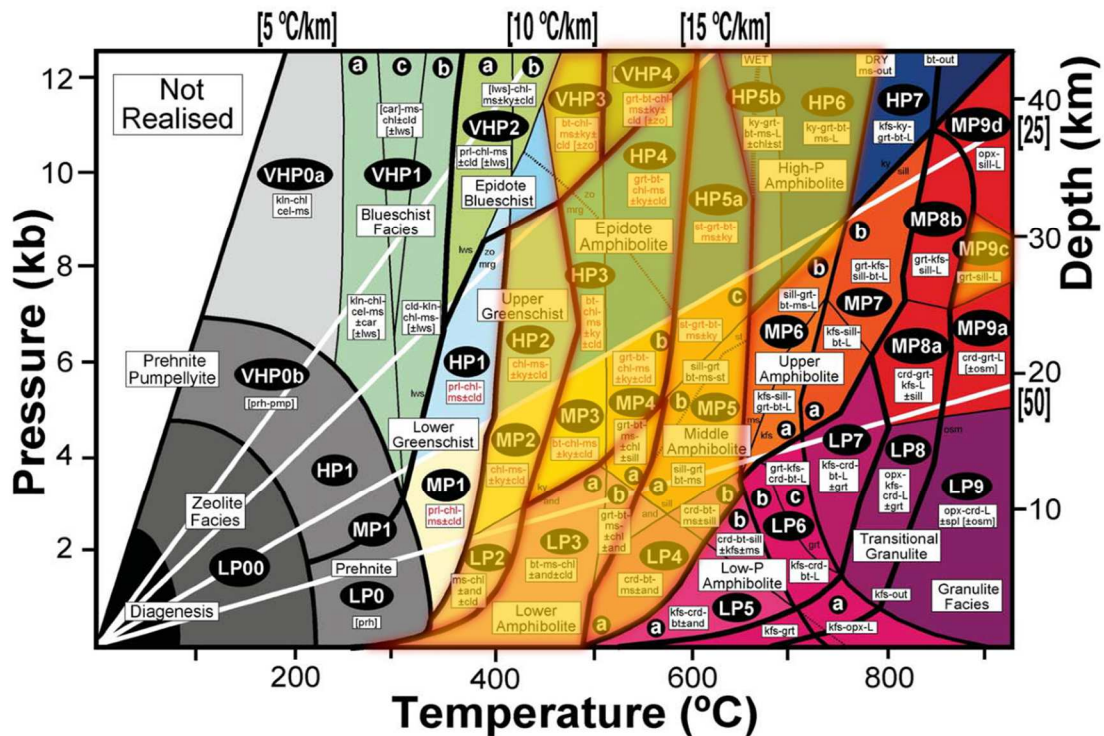


Figure 4 : Grille pétrogénétique composite quantitative pour la composition moyenne des métapelites avec les champs des minéraux diagnostiques. Les champs en surbrillance jaune correspondent aux assemblages métamorphiques identifiés dans la Sous-province du Pontiac par Jolly (1978), Camiré et Burg (1993) et Benn *et al.* (1994). Figure modifiée de Goscombe (2009).

4.1 Stratégie d'échantillonnage :

Le gradient métamorphique de la zone nord-est de la Sous-province de Pontiac a été décrit comme croissant du nord vers le sud (Imreh, 1984 et 1991). Six traverses ont été planifiées pour prendre en compte les différentes variables susceptibles d'influencer le gradient métamorphique (Figure 5). Les trois premières traverses sont parallèles à ce gradient et recoupent les structures selon un axe nord-sud. Les deux premières sont situées à l'écart de la minéralisation pour évaluer le gradient métamorphique « régional » de la Sous-province de Pontiac alors que la troisième mène au gisement Canadian Malartic, afin d'évaluer l'interaction entre la minéralisation et le métamorphisme régional. Les quatrième et cinquième traverses recoupent les structures de Pontiac à un faible angle et mènent aussi à la minéralisation de Canadian Malartic. Ces traverses permettront d'évaluer l'attitude des isogrades métamorphiques en réponse à la bifurcation de la zone de faille de Cadillac vers

le nord. Finalement, la sixième traverse est parallèle à la zone de faille de Cadillac afin d'évaluer l'effet des variations du protolithe sur le développement des minéraux métamorphiques.

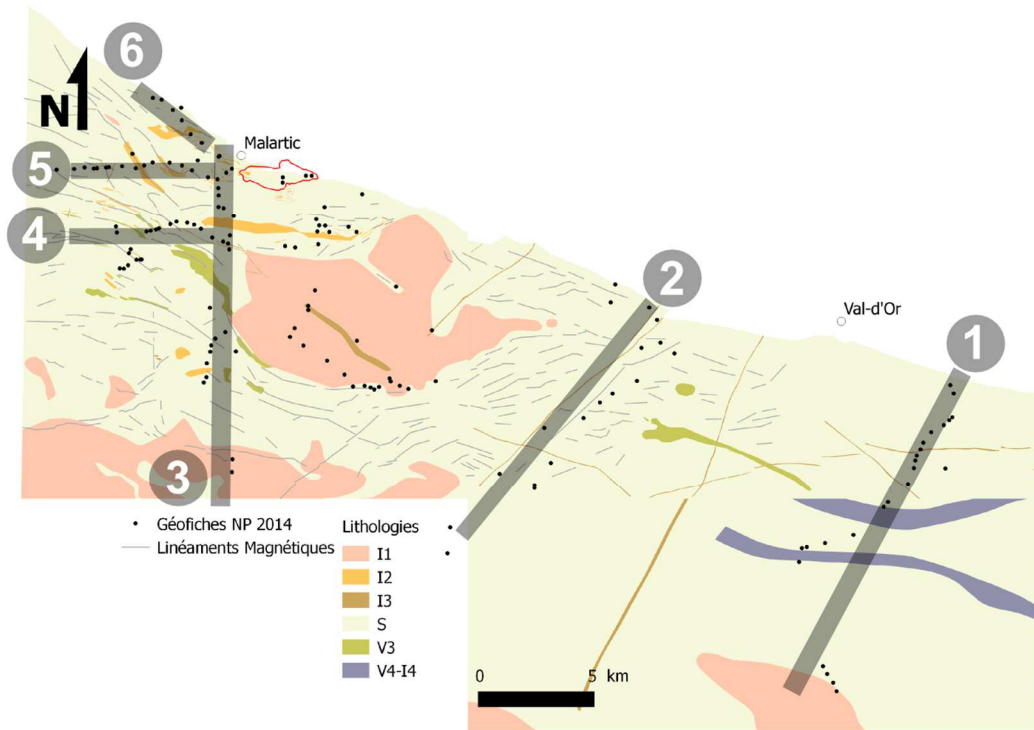


Figure 5 : Tracés des traverses effectuées dans la Sous-province du Pontiac à l'été 2014. Le contour de la fosse de la mine Canadian Malartic (rouge) date de 2013.

5. Observations

5.1 Étendue et représentativité de l'échantillonnage

Au total, 151 affleurements ont été visités à l'été 2014 dans le cadre de ce projet dans la Sous-province de Pontiac (Figure 5). De ce total, on compte 4 affleurements de roche volcanique, 19 de roches ignées intrusives et 128 de roches sédimentaires. Sur ces affleurements, on compte 81 mesures de litage primaire, 38 de polarité, 134 de foliation principale (S_2), 59 de linéation minérale et 35 de clivage. Une attention particulière a été accordée aux roches sédimentaires lors des observations structurales et de pétrologie métamorphique puisque cette unité est caractéristique de la Sous-province de Pontiac par

sa répartition spatiale et son cortège de minéraux métamorphiques. À partir des échantillons de terrain récoltés principalement dans les roches sédimentaires, 60 lames minces polies ont été coupées de façon normale à la linéation minérale et à la foliation principale pour effectuer des observations pétrologiques représentatives de la proportion modale des phases minérales. Il faut retenir que les indicateurs cinématiques observés dans ces lames minces ne sont pas représentatifs de la déformation par opposition à des lames coupées parallèlement à la linéation minérale.

5.2 Description macroscopique des lithologies et des fabriques structurales

La Sous-province de Pontiac est dominée par des roches sédimentaires détritiques marquées par des alternances centimétriques à métriques de grauwacke et de mudstone (Lajoie et Ludden, 1984) (Figure 6). Il est possible de déterminer la polarité à l'aide du granoclassement normal (Figure 6), des figures érosives (Figure 7) et parfois des figures de charge. La foliation principale (S_1) est marquée, à l'échelle macroscopique, par des plans d'alignement de phyllosilicates continus espacés de quelques millimètres (Figure 8) et il est régulièrement possible d'observer sur ces plans une linéation minérale marquée par des agrégats ou porphyroblastes de biotite (figure 9). Sur les affleurements, on peut exceptionnellement observer des structures de plis ou de « slumping » recoupées par la foliation principale. L'absence de foliation de plan axial suggère que la seconde hypothèse est la plus probable. Une lame mince prélevée dans la charnière de cette structure servira d'outils pour trancher la question dans ce cas particulier (Figure 10).

Des « kink-bands » d'amplitude décimétrique et d'espacements métriques forment le clivage postérieur à S_1 le plus évident sur le terrain (Q_3). Pourtant, un clivage de crénulation d'amplitude et d'espacement millimétrique plus pénétratif le précède (Q_2) (Figure 8). Son identification sur la surface altérée de l'affleurement est difficile mais sa fréquence d'observation et son étendue régionale est néanmoins importante. On distingue ainsi deux clivages, soit Q_2 et Q_3 , à l'échelle de l'affleurement. Une attention particulière aux différentes fabriques sera portée dans la description des lames minces.



Figure 6 : Roche sédimentaire de la Sous-province du Pontiac. Affleurement 14-NP-1593, la polarité interprétée est vers le sud, marquée par un granoclassement normal, indiquée par la transition entre les lits de grauwacke et les lits de mudstone.



Figure 7 : Grauwacke (S3). Affleurement 14-NP-1651, polarité vers le sud indiquée par des figures érosives.

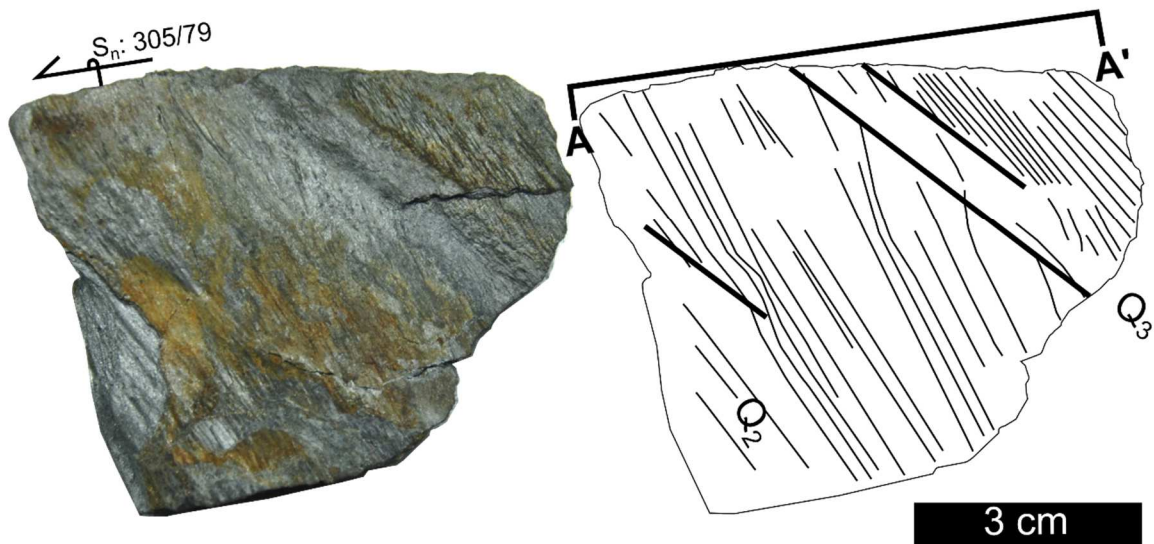
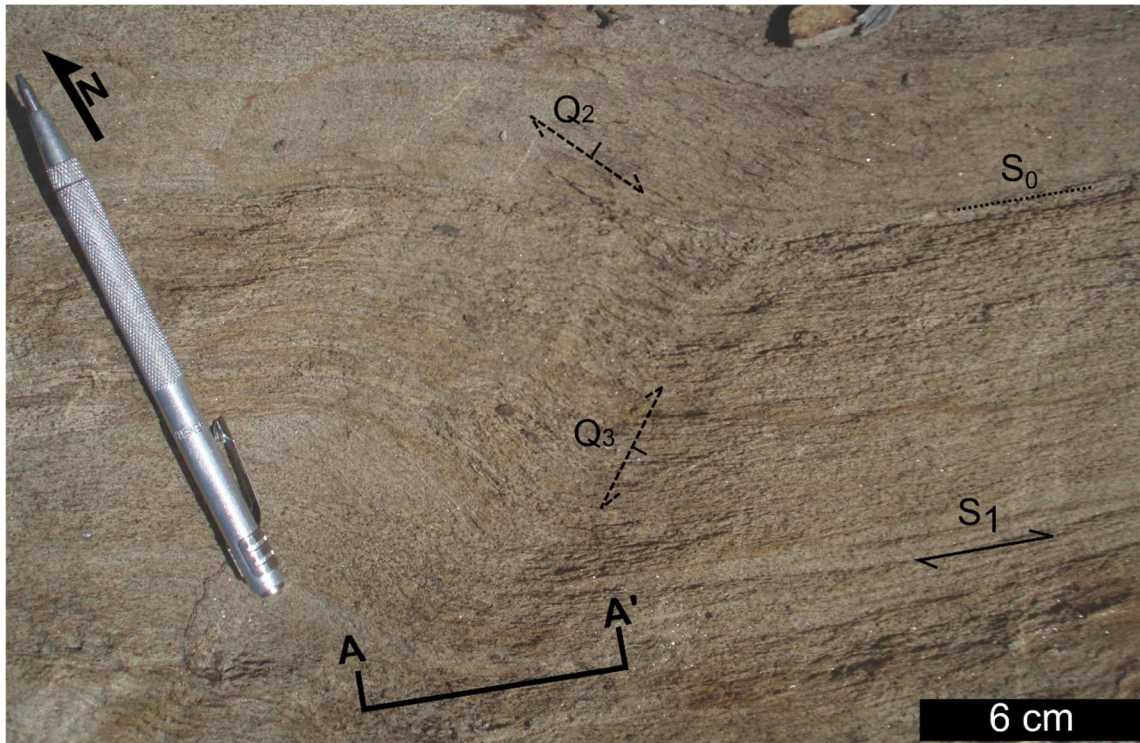


Figure 8 : Grauwacke (S3), affleurement 14-NP-1657. La foliation principale (S_1) est subparallèle au litage (S_0) et tous deux sont recoupés par un clivage de crénelation d'amplitude millimétrique (Q_2) ainsi que par des *kink-band* d'amplitude centimétrique (Q_3). L'échantillon représente une coupe verticale de l'affleurement faite parallèlement à S_p et illustre la superposition des clivages.



Figure 9 : Grauwacke (S3), affleurement 14-NP-1562. Le plan de la photo est subparallèle à la surface S_1 , la linéation minérale est marquée par des agrégats de biotite allongés. Les traces de crayon rouge soulignent l'horizontale ainsi que l'orientation de la linéation minérale. Les ondulations du plan de foliation sont causées par la présence de porphyroblastes de staurotide de taille centimétrique.

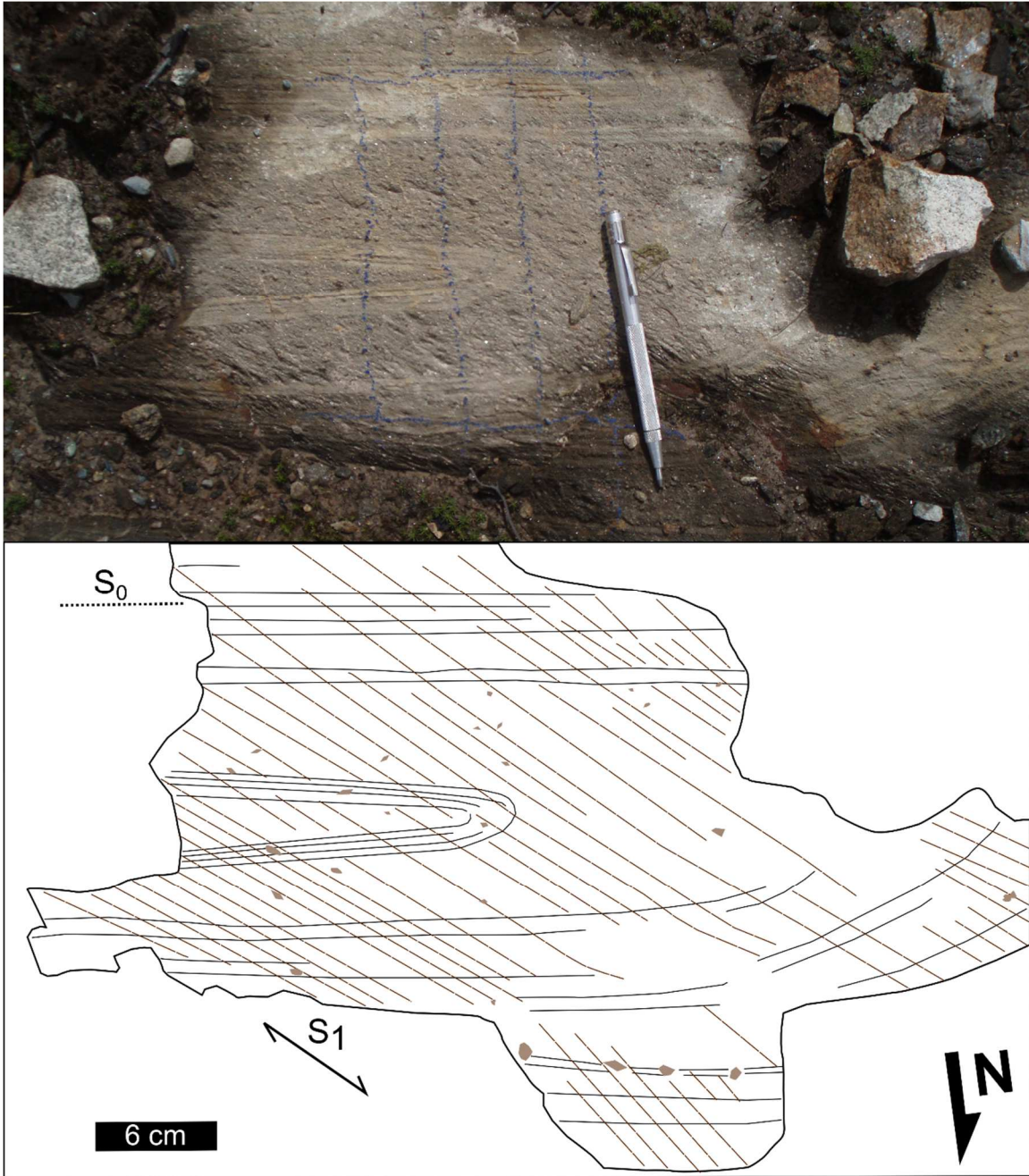


Figure 10 : Grauwacke (S3), affleurement 14-NP-1651. Structure de type « *transected fold* » ou de « *slumping* ». Les porphyroblastes de staurotide centimétriques sont colorés en brun.



Figure 11 : Basalte en coussins (code V3B), affleurement 14-NP-1691, déformé parallèlement à la foliation régionale (S_1). La photo présente le meilleur point de vue pour discuter de l'orientation du litage et de la polarité.

Des roches volcaniques extrusives de nature mafique à ultramafique sont présentes sous forme de bandes alignées parallèlement à la foliation principale et au litage des roches sédimentaires (Figure 4). Il n'a pas pu être clairement précisé si ces roches sont en contact stratigraphique normal avec les unités sédimentaires ou représentent des écailles structurellement mises en places au sein de la Sous-province de Pontiac. Le contact entre ces unités et les roches sédimentaires n'a pas été observé. On observe localement des affleurements de basalte en coussin déformés (Figure 11) sur lesquels il est difficile de prouver que le plan d'observation des coussins soit propice à l'observation de critères de polarité.

À la limite sud du terrain d'étude, le batholite de Decelles représente une intrusion hétérogène de composition globalement granitique à biotite-muscovite (Rive et al., 1990; Machado et al., 1991b; Mortensen et Card, 1993) d'envergure régionale (Figure 2). Il contient localement des masses pegmatitiques importantes. Le contact entre ce batholite et les roches sédimentaires n'a pas été identifié mais des enclaves de roches sédimentaires ont été échantillonnées. Le batholite ne semble pas déformé.

Le pluton du lac Fournière est situé au sud-est de la mine Canadian Malartic et, d'après le levé aéromagnétique (D'Amours et Intissar, 2012), il semble enveloppé par la foliation régionale. Ce pluton, dont la composition varie de diorite à diorite quartzifère, a été daté à 2682 ± 1 Ma (Davis, 2002). Les affleurements de composition sédimentaire visités montrent la hornblende parallèle à la foliation régionale S_1 . Des dykes de diabase magnétiques et non déformés recoupent les roches sédimentaires, volcaniques et le pluton du lac Fournière (Figure 12).



Figure 12 : Affleurement 14-NP-1506, grauwacke (code lithologique S3) et dyke mafique magnétique non folié.

5.3 Description microscopique des lithologies et des fabriques structurales

5.3.1 Zone à biotite-muscovite-chlorite

La minéralogie des roches sédimentaires dans les zones de bas grade métamorphique est caractérisée par une matrice homogène microgrenue de quartz et de feldspath. Les cristaux formant la matrice sont xénomorphes. Des phénocristaux aplatis de quartz et de feldspath de taille millimétrique se distinguent du reste de la matrice, leur allongement est parallèle à S_0 (Figure 13). Les porphyroclastes de phyllosilicates donnent une texture lépidoblastique à la roche et la variation de leur abondance au sein d'un échantillon marque les changements de bancs et indique ainsi l'orientation du litage primaire. La foliation principale est définie par un alignement discontinu, parfois continu, de phénocristaux de biotite et de chlorite ainsi que de la muscovite microcristalline à angle ou parallèle avec S_0 (Figures 13 et 14 respectivement). Il est possible d'observer régulièrement des

porphyroblastes biotite et de chlorite définissant la fabrique S_1 (Figures 13 et 14). À l'échelle macroscopique on observe un clivage de pression-dissolution parallèle à S_1 . Ponctuellement, on observe le clivage de crénulation Q_2 recoupant la foliation principale à un angle de 30 à 40°.

De façon indépendante des isogrades, on observe des zones à actinote limitées par des strates dans les roches sédimentaires (Figure 15). En lame-mince (Figure 16), on constate que ces actinotes ne comprennent pas d'inclusion de biotite, montrent une orientation aléatoire et qu'elles ne sont pas enveloppées dans S_1 .

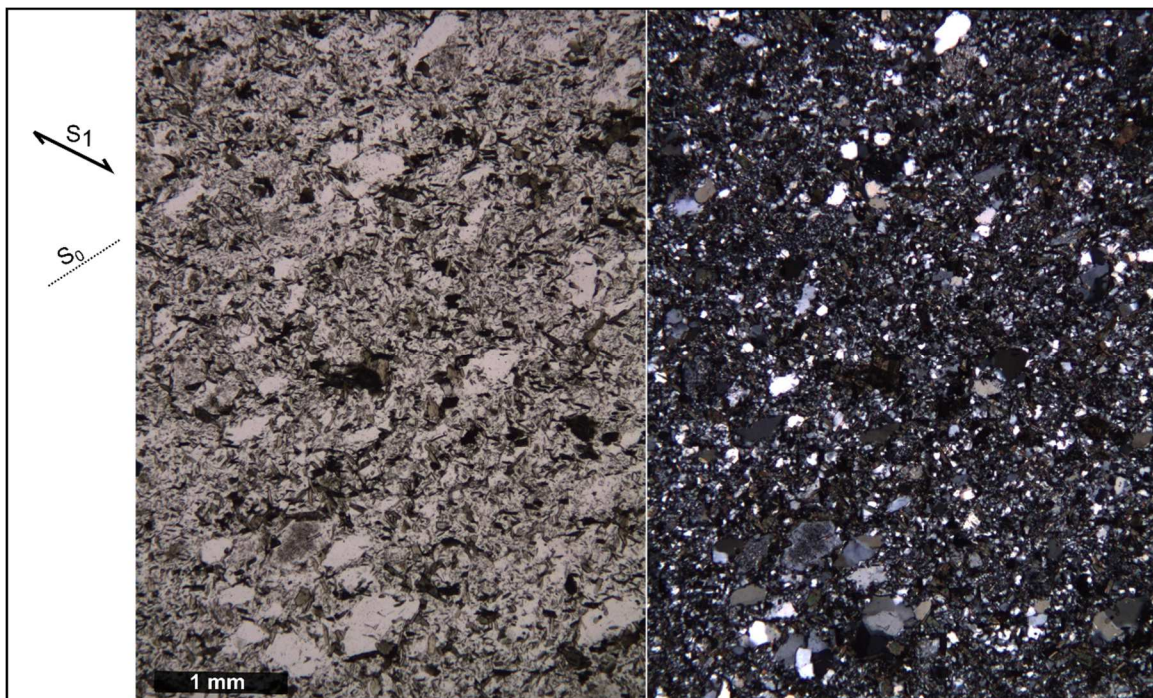


Figure 13 : Affleurement 14-NP-1502, Grauwacke. S_0 est défini par les phénocristaux de quartz et de feldspaths allongés. S_1 correspond à l'alignement des porphyroblastes de biotite et de chlorite.

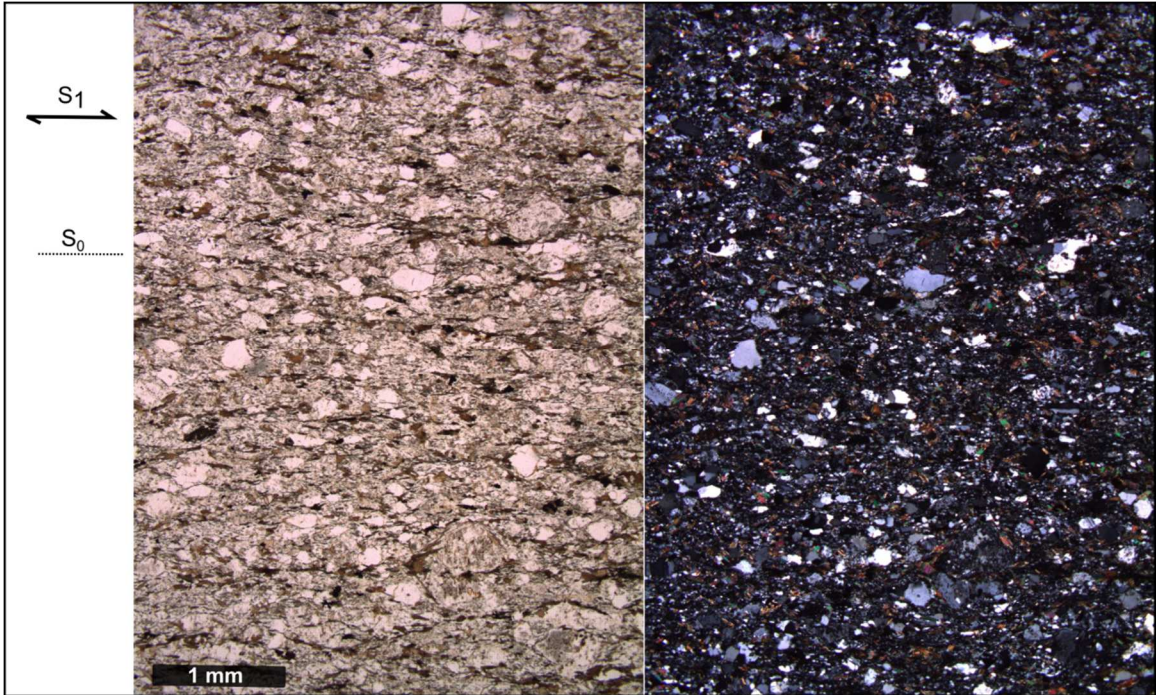


Figure 14 : Affleurement 14-NP-1507, Grauwacke. Les fabriques S_0 et S_1 sont subparallèles, telles qu'observées en affleurement.



Figure 15 : Affleurement 14-NP-1509, Grauwacke avec amas de porphyroblastes d'actinote et d'albite distribués de façon subconcordante à la stratification S_0 . Ces amphiboles ne présentent aucune orientation préférentielle.

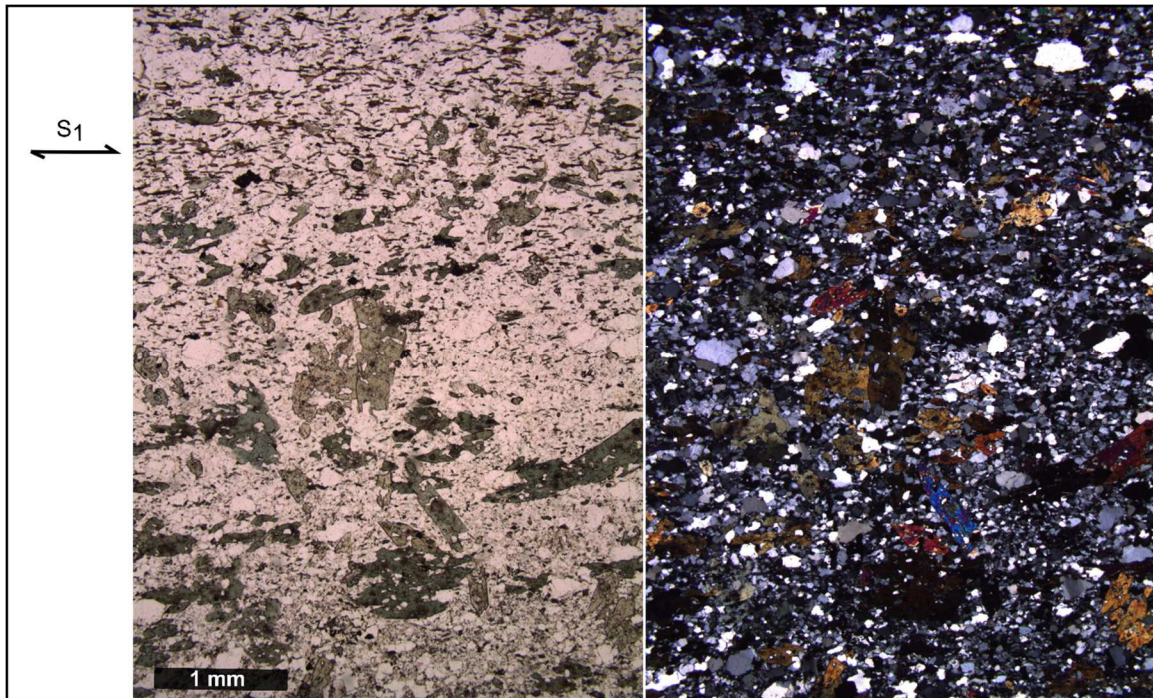


Figure 16 : Affleurement 14-NP-1509, Grauwacke. La fabrique S_1 est marquée par une orientation préférentielle des porphyroblastes de biotite. Les porphyroblastes d'actinote, idiomorphes à hypidiomorphes, montrent une orientation aléatoire. Les niveaux riches en porphyroblastes d'actinotes et albite sont pauvres en biotite.

5.3.2 Zone à biotite-chlorite-muscovite-grenat

L'apparition de grenat est précédée d'un changement graduel de la matrice qui devient granoblastique. Généralement, la foliation S_1 et possiblement Q_2 ne semblent pas envelopper les porphyroblastes de grenat tel qu'observé au centre de la figure 18. Cependant, par endroit, le grenat est enveloppé dans la foliation principale mais on n'observe pas d'ombre de pression et son patron d'inclusion est rectiligne bien que légèrement oblique par rapport à S_1 .

5.3.3 Zone à biotite-chlorite-muscovite-grenat-staurotide

La foliation principale ne s'intensifie pas de façon notable avec l'apparition des porphyroblastes de staurotide. Elle est encore principalement discontinue mais des alignements continus de micas sont plus fréquents. Les assemblages métamorphiques précédents sont conservés et les cristaux de staurotide ont une texture poecilitique formant parfois des pseudomorphes de biotite (Figure 19). De plus, une auréole de quartz est généralement présente autour des porphyroblastes de staurotide. Ces derniers comprennent

régulièrement une trace de la foliation principale dans leur patron d'inclusions et dans les pseudomorphes de biotite.

5.3.4 Zone à biotite-muscovite-grenat-staurotide-kyanite

La kyanite a été observée sur un échantillon. Elle est associée à un horizon riche en biotite dans un échantillon à paragenèse de biotite, grenat, staurotide. Cet échantillon correspond à l'assemblage de plus haut grade métamorphique observé dans le terrain à l'étude (Figure 20). Sa faible abondance, son habitus xénomorphe et la matrice fortement recristallisée brouillent les observations texturales qui auraient pu permettre de situer la kyanite par rapport aux épisodes de déformations.

5.4 Autres minéraux métamorphiques

Un minéral inconnu, entièrement pseudomorphisé par de la muscovite, a été identifié à plusieurs endroits dans le terrain étudié (Figure 21 et 22).

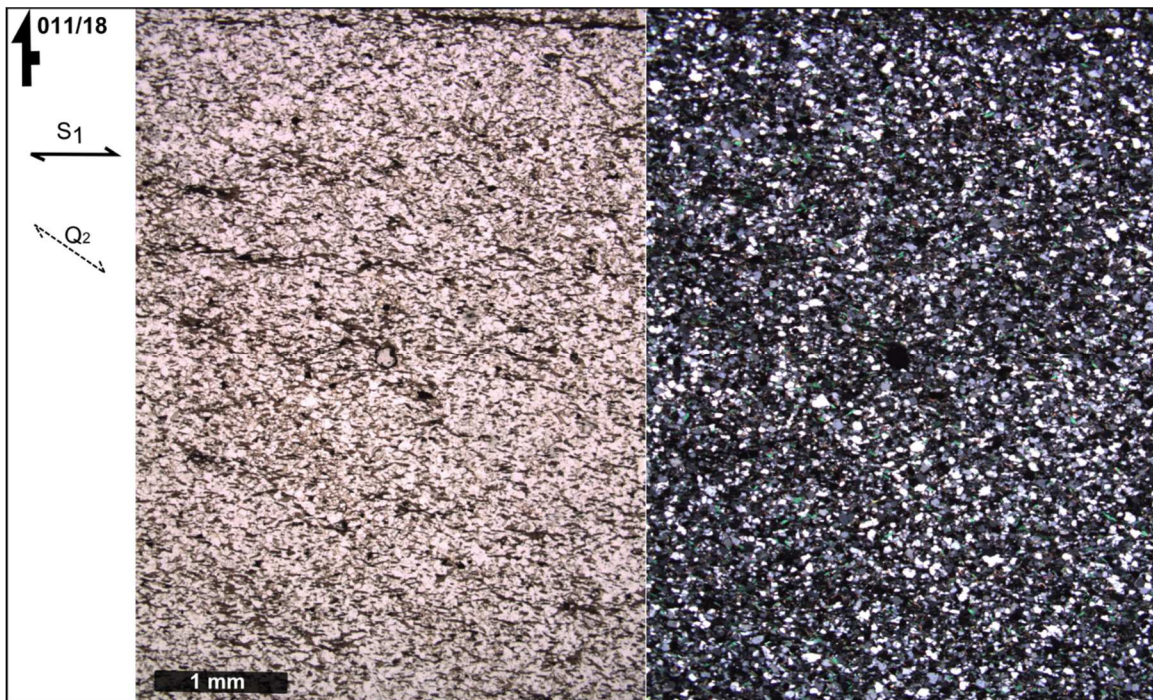


Figure 18: Affleurement 14-NP-1614, Grauwacke. La fabrique S_1 est marquée par un alignement discontinu à continu de biotite, muscovite et chlorite. Un clivage de crénulation recoupe la foliation principale et semble précéder la croissance du porphyroblaste de grenat au centre du champ de vision. Les orientations en affleurement de S_1 (281/84) et de Q_2 (320/90) sont similaires à celles observées sur cette lame mince.

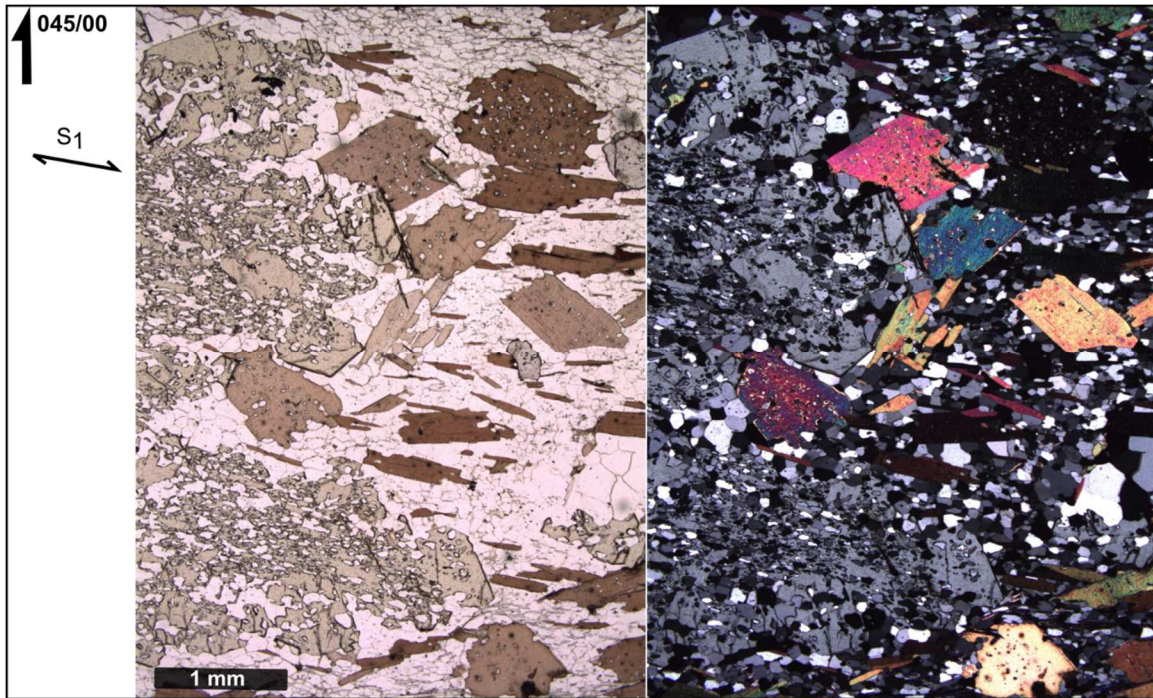


Figure 19 : Affleurement 14-NP-1520, Grauwacke. Porphyroblaste de staurotide à texture poecilo-porphyroblastique. Le patron d'inclusion au sein du staurotide est subparallèle à S_1 . Des zones pauvres en inclusion au sein du staurotide ayant la forme des porphyroblastes millimétriques de biotite adjacent suggèrent que la biotite est pseudomorphisée par le staurotide.

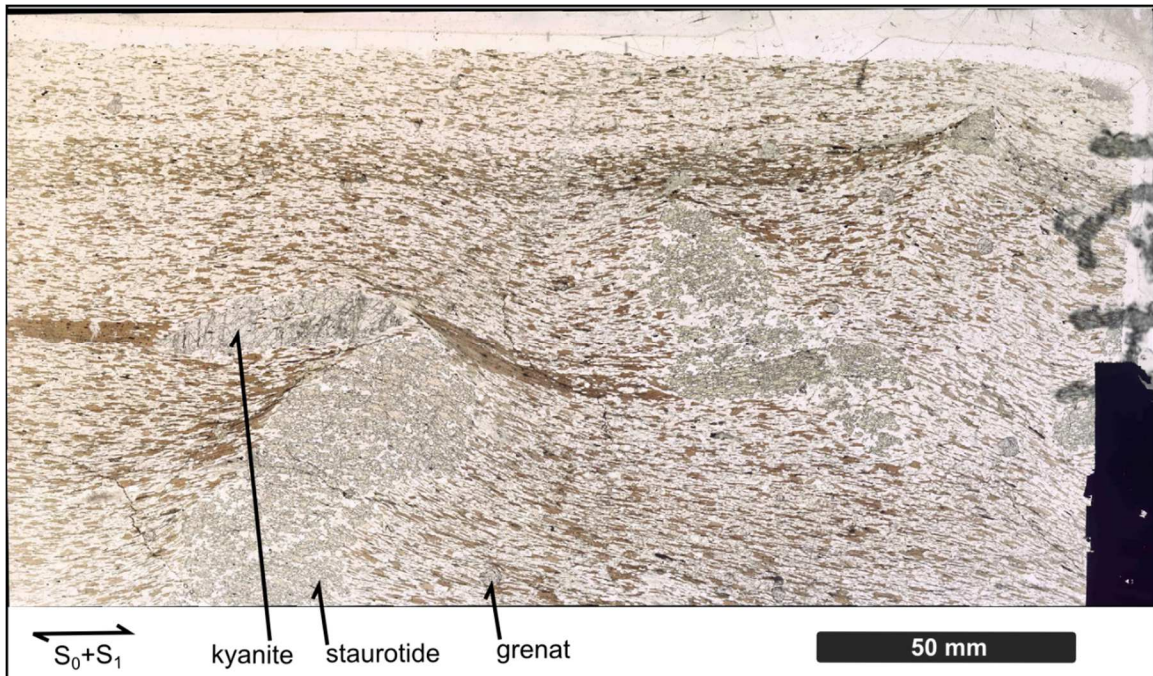


Figure 20: Affleurement 14-NP-1642, Grauwacke. Porphyroblaste de kyanite aligné dans un niveau riche en biotite marquant probablement le litage primaire (S_0). La matrice de quartz et de feldspath montre une texture granoblastique. La biotite ainsi que la chlorite marquent la foliation principale.

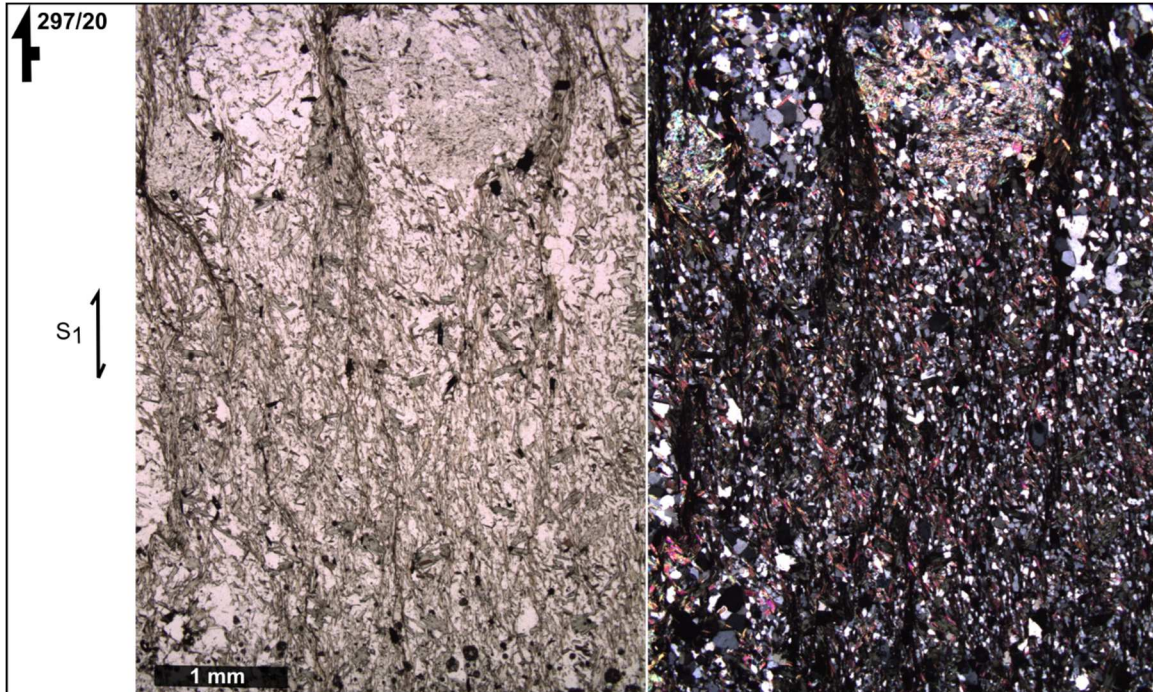


Figure 21 : Affleurement 14-NP-1568, Grauwacke. La fabrique S_1 est marquée par la biotite r trograd e en chlorite. Des porphyroblastes rétrogradés en muscovites sont enveloppés dans la foliation principale.

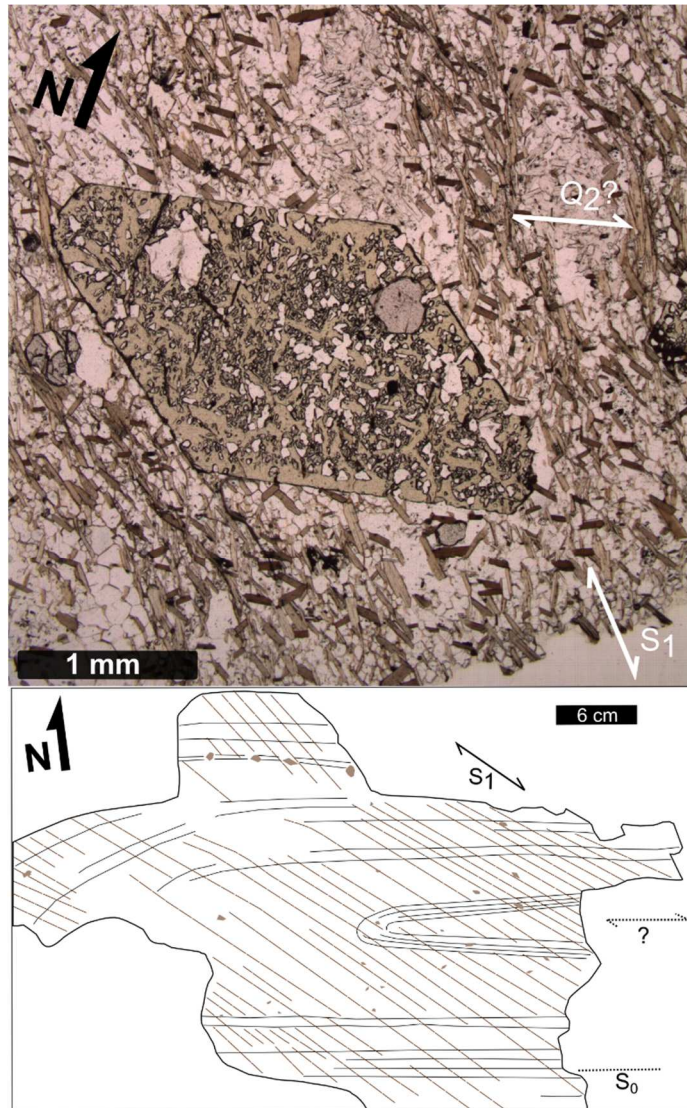


Figure 22 : Affleurement 14-NP-1651, Grauwacke. Photomicrographie de la lame mince correspondant à la charnière de la structure s'apparentant à un pli de l'affleurement 1651, lumière polarisée. On observe sur un plan perpendiculaire à la foliation S_1 et sa linéation une fabrique faiblement définie soulignée par des porphyroclastes de biotite, parallèle à la stratification S_0 . La stratification S_0 est tronquée par la foliation principale S_1 . On observe aussi des amas de muscovite et feldspath enveloppés dans la foliation principale qui pourraient marquer la rétrogression d'un porphyroblastes inconnu. La photo de la lame mince est accompagnée du schéma interprétatif de l'affleurement tiré de la figure 8.

La figure 23 présente les localités où les minéraux métamorphiques mentionnés précédemment ont été identifiés ainsi que l'intensité relative des fabriques S_1 et Q_2 . La première observation de grenat est située à moins de un kilomètre de la fosse de Canadian Malartic et à environ 1,2 kilomètre de la limite nord de la Sous-province de Pontiac. Bien que la biotite et la muscovite ne soient pas toujours rattachées ensemble à la foliation principale, la figure 23 démontre que leur répartition est régionale. Il est important de noter que pour les échantillons situés en bordure de la faille de Cadillac et du batholite de Decelles, la chloritisation intense de la biotite fait diminuer la proportion modale de ce minéral. Finalement, le minéral inconnu, identifié sur la carte comme de l'andalousite, ne semble pas spatialement associée aux grands massifs intrusifs. Le tableau 1 contient la légende explicative de l'indice qualitatif de l'intensité des fabriques S_1 et Q_2 . Le tableau 2 contient un résumé des observations en lame mince ayant permis de réaliser les figures de la planche 23.

Tableau 1 : Légende de l'indice qualitatif de l'intensité de la déformation

Structure	0	1	2	3	4	5
S_1	Non identifié	Alignements préférentiels de micas discontinus et espacés difficiles à identifier	Alignements de micas parfois continus et espacés	Alignements de micas parfois continus et espacés de 0,5 mm	Alignements de micas continus et espacés de moins de 0,5 mm	Alignements de micas continus et espacés de moins de 0,1 mm
Q_2	Non identifié	Très faible clivage, pas de mica formé	Clivage parfois continu, pas de mica formé	Clivage continu, pas de mica formé	Clivage continu avec micas formés	Foliation continue et presque aussi dominante que S_1

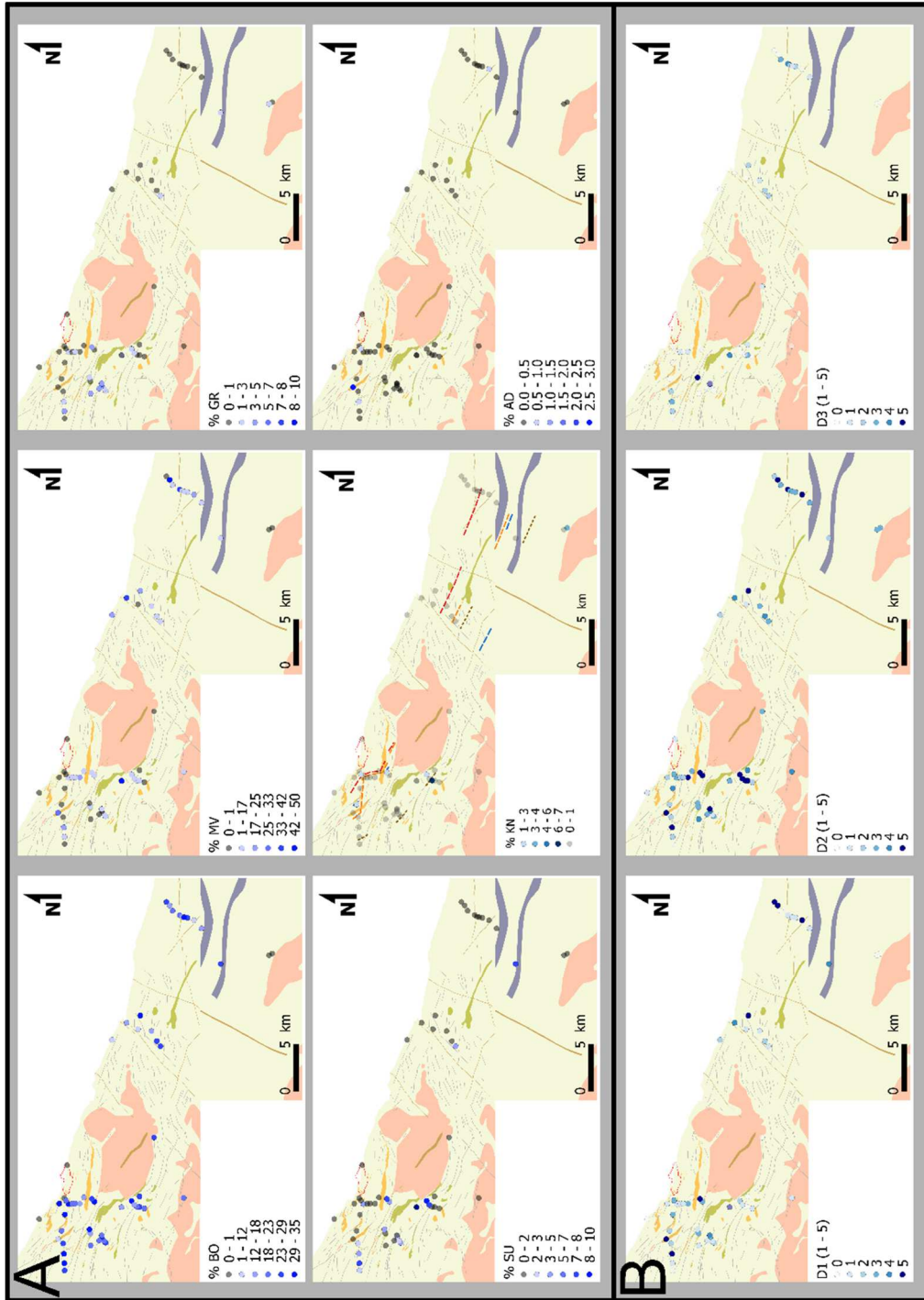


Figure 23 : (A) Occurrence et pourcentage modal des minéraux métamorphiques identifiés en lame-mince. (B) Indice qualitatif de l'intensité des épisodes de déformation basé sur la continuité et l'espace entre les fabriques planaires. Par exemple, D2 correspond à la foliation principale S₂. Les fabriques développées durant D1 et D3 ne surpassent pas D2 en intensité. BO : Biotite, MV : Muscovite, GR : Grenat, SU : Staurotide, KN : Kyanite, AD : Andalousite. Le contour de la fosse de la mine Canadian Malartic (rouge) date de 2013.

Tableau 2 : Résumé des descriptions des lames-minces.

No	Corps	BO	MV	CL	GR	SU	AD ?	QZ	FP	AC	Autre	S1	Q2	Granulometrie matrice	CL+	SR+
1500	S3	1	0	25	0	0	0	69	5	0	0	0	0	1	5	1
1502	S3	30	0	1	0	0	0	59	10	0	0	2	0	1	1	0
1504	S3	15	20	0	0	0	0	65	0	0	0	5	1	1	0	0
1505	S3	31	10	5	1	5	0	48	0	0	0	5	0	2	3	0
1507	S3	10	20	0	0	0	0	60	10	0	0	2	0	2	2	1
1509	S3	10	0	1	0	0	0	54	5	30	0	1	0	3		
1511	S3	15	35	1	0	0	0	42	7	0	0	4	0	3	1	0
1514	S3	30	20	0	0	0	0	20	49	1	0	5	2	1	3	0
1515	S3	15	10	1	1	0	0	70	3	0	0	3	1	2	1	0
1517	S3	25	10	1	2	4	0	50	8	0	0	3	2	2	0	0
1518	S3	25	10	1	1	0	0	63	0	0	0	4	2	2	1	0
1520	S3	35	10	1	2	10	0	42	0	0	0	3	0	5	2	0
1562	S3	25	15	5	2	7	0	46	0	0	0	2	0	3	4	4
1566	S3	0	0	25	1	0	0	30	40	0	0	3	0	4	5	3
1567	S3	0	0	25	2	0	0	40	35	0	0	3	0	4	5	3
1568	S3	7	20	30	0	0	1	43	0	0	0	5	0	3	5	5
1589	S3	25	0	5	0	0	0	70	0	0	0	2	0	3	2	2
1590	S3	15	50	0	0	0	0	35	0	0	0	5	0	2	3	0
1591	S3	20	10	0	0	0	0	70	0	0	0	3	3	4	0	1
1592	S3	15	50	0	0	0	0	35	0	0	0	3	4	4	0	0
1593	S3	20	40	0	0	0	0	40	0	0	0	5	4	3	0	0
1594	S3	15	5	2	0	0	0	78	0	0	0	3	2	5	2	0
1613	S3	15	10	1	0	0	0	74	0	0	0	3	1	5	2	0
1614	S3	25	10	5	1	0	0	59	0	0	0	3	2	2	3	0
1615	S3	30	5	2	0	0	0	63	0	0	0	3	1	3	1	0
1633	S3	25	0	2	1	0	0	32	40	0	0	3	1	4	2	4
1636	V3	0	0	0	0	0	0	49	1	0	0	1	0	0	0	0
1640	S3	20	3	0	0	0	0	40	37	0	0	4	0	4	0	2
1643	S3	25	0	1	1	0	0	33	40	0	0	4	1	4	0	1
1645	S3	0	0	10	0	0	0	45	40	0	0	1	0	1	5	0
1647	S3	25	0	28	0	3	0	22	50	0	0	0	0	2	5	4
1648	S3	30	3	5	5	7	0	50	0	0	0	2	2	3	2	0
1651	S3	30	20	5	3	5	1	36	0	0	0	5	3	5	1	0
1654	S3	25	0	5	1	2	0	67	0	0	0	2	2	3	2	0
1656	S3	3	30	4	0	0	3	60	0	0	0	5	0	3	5	1
1658	S3	20	0	5	1	0	0	40	33	0	0	2	0	3	3	3
1662	S3	35	0	0	0	0	0	60	0	0	0	4	0	2	0	0
1664	S3	30	3	2	2	5	0	58	0	0	0	3	0	4	2	0
1665	S3	20	0	5	1	0	1	72	0	0	0	3	0	3	4	0
1666	S3	30	5	2	2	10	0	50	0	0	0	5	0	4	3	0
1667	S3	25	15	5	1	0	0	54	0	0	0	5	3	4	3	0
1668	S3	20	5	10	0	0	0	23	40	0	0	5	0	5	0	4
1669	S3	15	5	2	2	7	0	69	0	0	0	5	0	4	2	0
1671	S3	25	15	5	5	7	0	42	0	0	0	5	0	2	1	4
1672	S3	15	5	7	0	0	0	72	0	0	0	3	0	4	0	0
1673	S3	20	5	3	0	0	0	72	0	0	0	2	1	3	1	0
1674	S3	20	5	7	2	0	0	66	0	0	0	2	0	2	1	0
1675	S3	0	0	30	0	0	0	70	0	0	0	1	0	1	5	0
1676	S3	20	0	0	1	0	0	77	0	0	0	2	0	3	0	0
1679	S3	25	5	5	2	5	0	68	0	0	0	3	0	3	1	0
1680	S3	20	5	5	2	3	0	65	0	0	0	1	0	3	1	0
1681	S3	25	0	2	5	3	0	62	0	0	0	4	0	3	1	0
1682	S3	30	0	3	10	2	0	55	0	0	0	3	5	4	1	0
1683	S3	20	3	1	5	1	0	40	0	0	0	5	0	5	1	0
1684	S3	20	0	10	5	0	0	50	0	0	0	3	0	4	2	0
1687	S3	20	0	2	5	0	0	73	0	0	0	4	0	4	1	0
1688(1)	S3	15	10	5	0	0	0	70	0	0	0	3	0	4	1	0
1688(2)	V3B	10	0	0	2	0	0	63	0	0	0	1	0	1	0	0
1690	S3	30	0	7	3	5	0	55	0	0	0	3	5	3	3	0

6. Interprétation

6.1 Modèle structural et métamorphique combiné

Quatre fabriques distinctes d'étendue régionale ont été observées en lame mince, elles sont nommées S_0 , S_1 , Q_2 et Q_3 . Cette classification est descriptive et ne suggère pas l'existence de trois événements de déformations distincts. La figure 24 résume les interprétations tectonométamorphiques de cette section.

La foliation principale (S_1) est définie par un alignement discontinu à continu de biotite, muscovite et chlorite hypidiomorphe. Cette foliation est observable à l'échelle du terrain étudié. Par rapport à cet épisode de déformation, le grenat est tardi- à post-cinématique puisqu'il est parfois enveloppé par S_1 mais conserve une trainée d'inclusion droite, à angle faible avec S_1 et ne développe pas d'ombre de pression. Le staurotide est post-cinématique par rapport au grenat et à S_1 puisqu'il contient du grenat en inclusion, qu'il se développe souvent comme pseudomorphes de la biotite de la foliation principale et que la trace de son patron d'inclusion est parallèle à S_1 . Sur certains affleurements, les porphyroblastes de staurotide subissent une légère rotation qui pourrait être due à un événement de déformation subséquent à S_1 . La kyanite est peu abondante et il est difficile d'en décrire l'habitus.

La foliation régionale enveloppe le pluton du lac Founière telle un porphyroclaste, comme illustré par le tracé des linéaments magnétiques à la figure 2. La foliation tectonique observée au sein du pluton est aussi parallèle à la foliation régionale S_1 ce qui suggère que la mise en place de cet intrusif est synchrone ou antérieure à l'épisode de déformation D_1 . Cette interprétation est corroborée par les datations colligées à partir de la littérature (figure 3). Aucune évidence significative de métamorphisme de contact n'a été observée en bordure du pluton. Il est possible qu'il y ait eu un métamorphisme de contact lié à cet épisode intrusif mais son effet serait alors perturbé par le pic métamorphique régional.

Le clivage de crénulation Q_2 se surimpose à la foliation principale et développe parfois une foliation embryonnaire, marquée par un alignement discontinu de muscovite ou de biotite orienté NE-SO. Ce clivage de crénulation est d'amplitude millimétrique et il est possible de corrélérer son orientation entre la mesure de l'affleurement et celle faite sur la lame mince

orientée. La linéation d'intersection entre Q_2 et S_1 apparaît subparallèle à la linéation minérale de la biotite sur S_1 . Tel que suggéré par Camiré, il semble y avoir un « partitionnement » de la déformation D_2 puisque l'intensité de Q_2 est variable et ne semble pas être corrélée avec les zones d'assemblages métamorphiques. Peu de porphyroblastes de grenat, de staurotide ou de kyanite ont été observés en relation avec Q_2 , il est difficile de qualifier leur relation temporelle. Un dernier événement de déformation entraîne la formation de *kink-band* décimétriques Q_3 . Ces structures n'ont pas été échantillonnées et sont considérées tardives par rapport au pic métamorphique régional.

La figure 25 présente le tracé des isogrades d'identification des minéraux métamorphiques établis à partir des observations de terrain et des observations en lame-mince. Ces isogrades n'impliquent pas de réaction métamorphique. La figure 25A illustre comment les isogrades semblent être parallèles à la foliation régionale S_1 dans l'est et dévient à proximité de la mine. Leur tracé est fortement biaisé par la localisation des affleurements, limités dans le secteur. Il serait possible de corriger cette lacune à l'aide des forages de condamnation situés sur la propriété minière de la mine Canadian Malartic. La figure 25B présente des exemples de lames-minces correspondants aux zones métamorphiques situées entre les isogrades. Sur cette figure, les photos 1 et 2 illustrent comment il semble y avoir une réduction de la taille de la matrice à certains endroits à proximité de la faille de Cadillac. La photo 4 présente l'échantillon contenant du grenat et du staurotide situé à moins de 1 km de la fosse de Canadian Malartic. La position de l'isograde de la kyanite, photo 6, doit être confirmée à la microsonde, tout comme l'existence possible d'andalousite.

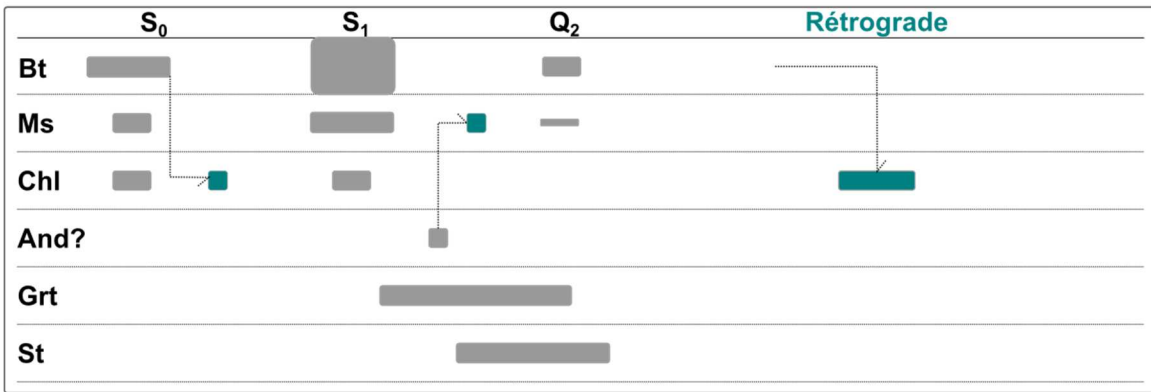
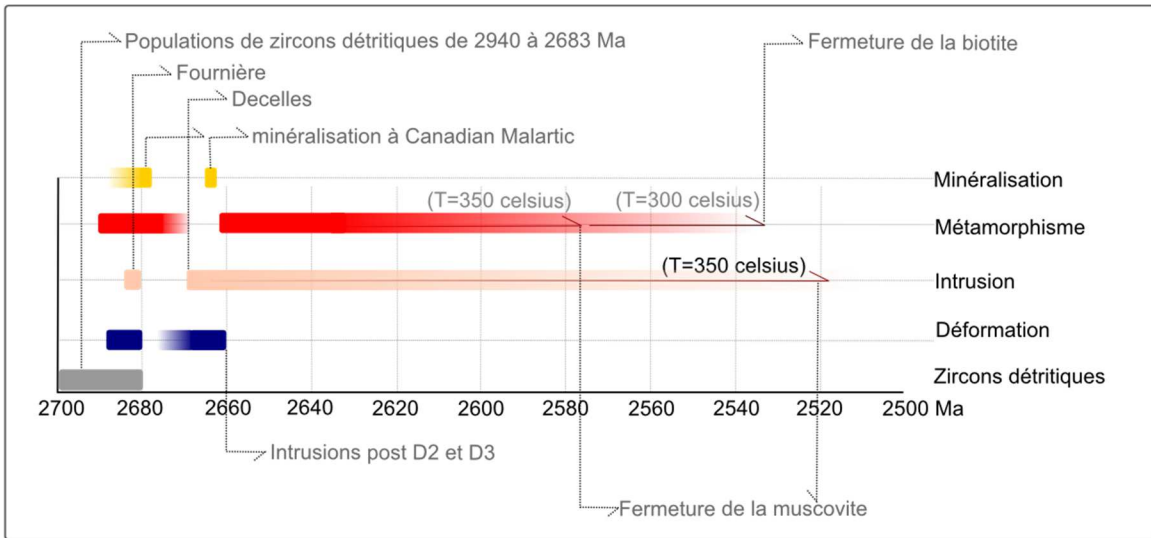


Figure 24 : Synthèse des interprétations tectonometamorphiques et des principales datations Les datations proviennent de Gariépy *et al.* (1984), Machado *et al.* (1991b, 1991c), Feng *et al.* (1992), Mortensen et Card (1993), Powell *et al.* (1995), Robert (2001), Davis (2002) et De Souza *et al.* (2015). Bt : biotite, Ms : muscovite, Chl : chlorite, And : andalousite, Grt : grenat, St : staurotide et And: andalousite.

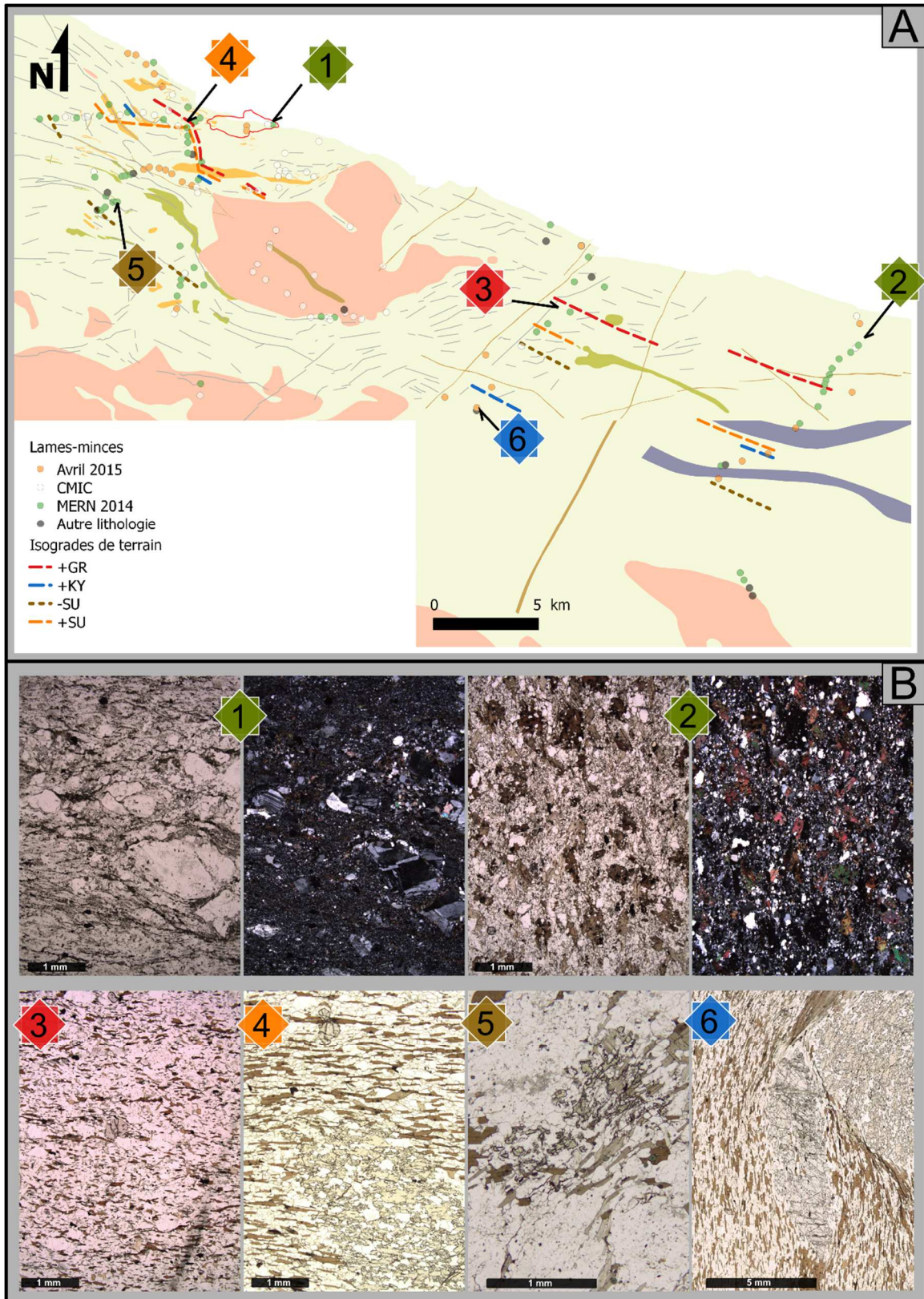


Figure 25 : (A) Carte des isogrades. (B) Exemple d'échantillons provenant des zones métamorphiques associées. Le contour de la fosse de la mine Canadian Malartic (rouge) date de 2013.

6.2 Comparaison avec les travaux antérieurs

L'ensemble des travaux de Goulet (1978), Camiré et Burg (1993), Benn *et al.* (1994) et Ghassemi (1996) considèrent S_1 comme foliation principale et S_2 comme un clivage de crénulation. Dans le nord-est de la Sous-province de Pontiac, cette séquence de fabriques a aussi été observée. Peu de plis ont été observés durant la campagne de terrain à l'été 2014 dans le nord-est de la Sous-province de Pontiac. Dans la portion nord du transect 1 (figure 5), une opposition régulière des critères de polarité indiquait l'occurrence de plissement isoclinal répété sans que cette structure soit observée en coupe perpendiculaire à l'axe de pli. L'interprétation de nappe de charriage de Camiré et Burg (1993) est donc difficile à défendre pour la portion nord-est de la Sous-province de Pontiac.

Tel qu'observé par Benn *et al.* (1994) dans la portion nord-ouest de la Sous-province de Pontiac, la linéation minérale d'agrégat de biotite n'est pas orientée de façon constante dans le terrain étudié (figure 26). Un plissement tardif pourrait expliquer cette variation (Benn *et al.*, 1994), une interférence causée par la présence rigide du pluton du lac Fournière lors de D_2 ou la présence de trois blocs structuraux différents (Camiré et Burg, 1993). Tel que discuté précédemment, il est fort probable que la linéation d'intersection entre la foliation principale avec le plan de clivage ou la foliation S_1 soit perçue comme une linéation minérale sur le terrain. En fonction de l'orientation de la linéation d'intersection entre S_1 et S_2 ainsi que S_2 et S_3 et de l'intensité respective de ces foliations, il est possible d'obtenir deux linéations d'intersections d'orientations différentes. La planche 1B montre que le secteur délimité à la figure 26 correspondant à une linéation minérale orientée vers l'ouest semble être associé à des échantillons ayant un indice d'intensité D_3 plus élevé. Des lames-minces supplémentaires sont en préparation et permettront de valider cette hypothèse.

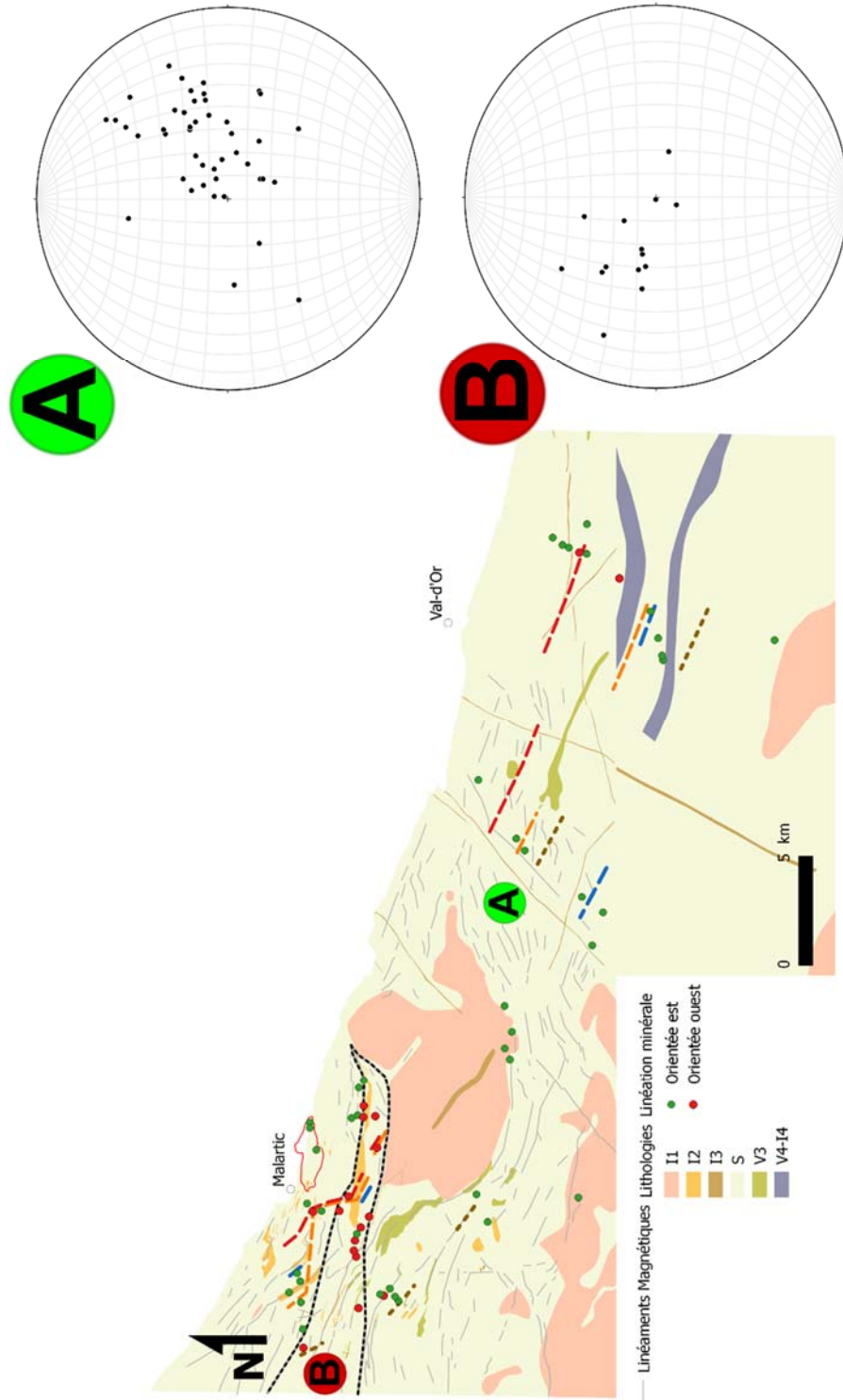


Figure 26 : Linéation minérale marquée par les agrégats de biotite. Le secteur B, délimité par la ligne hachurée, illustre les linéations minérales montrant majoritairement une plongée vers l'ouest. Le reste du secteur étudié, le secteur A, possède une linéation minérale à plongée majoritairement vers le nord-est. Le contour de la fosse de Canadian Malartic (rouge) date de 2013.

7. Conclusions et travaux futurs

Les observations tectono-métamorphiques effectuées en affleurement et sur lames minces suggèrent l'existence de quatre familles de structures distinctes dans le nord-est de la Sous-province de Pontiac. De ces épisodes, une seule est en directe association avec la formation de minéraux métamorphiques. La première, vestige du litage primaire S_0 , est associée à une foliation caractérisée principalement par des porphyroclastes de biotite partiellement à entièrement chloritisés observée au sein des microlithons de la foliation principale S_1 , particulièrement dans les charnières de pli P_1 . La foliation principale S_1 est caractérisée par un alignement continu à discontinu de biotite et de muscovite. La formation de grenat, puis du staurotide est tardi- à post-cinématique par rapport à S_1 . Ces interprétations suggèrent que le pic métamorphique de la Sous-province de Pontiac est au minimum synchrone à tardif par rapport à la foliation principale S_1 . Cependant, la vitesse relative de cristallisation des minéraux métamorphiques fait en sorte que l'effet du pic métamorphique n'est pas enregistré ponctuellement dans l'espace. Q_2 est caractérisé par un clivage de crénulation millimétrique surimposé sur S_2 entraînant parfois la cristallisation de biotite et de muscovite. Les travaux à venir consistent à confirmer les observations pétrologiques à la microsonde. Une modélisation thermobarométrique précise sera effectuée afin de définir l'intensité du pic métamorphique ainsi que le gradient associé au deuxième épisode métamorphique de la Sous-province de Pontiac. Des datations Lu/Hf seront effectuées sur des concentrés de grenat provenant d'affleurements clefs afin de contraindre temporellement le pic du métamorphisme. Ces résultats seront présentés dans un mémoire de maîtrise en cours de rédaction par le premier auteur à l'université Laval.

8. Références

- Ague, J.J., (1991). *Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites*, *Geology*, 19: 855-858.
- Bédard, J.H., Harris, L.B., Thurston, P.C., (2013). *The hunting of the snArc*, *Precambrian Research*, 229: 20-48.
- Benn, K., Miles, W., Ghassemi, M.R. et Gillett, J., (1993). *Crustal structure and kinematic framework of the northwestern Pontiac Subprovince, Quebec: an integrated structural and geophysical study*, *Can. J. Earth Sci.*, 31: 271-280.
- Camiré, G.E., (1992). *Évolution tectono-métamorphique de la partie nord-ouest de la Sous-province archéenne de Pontiac, Bouclier canadien*, thèse de doctorat non-publiée, Université de Montpellier, Montpellier, France.
- Camiré, G.E. et Burg, J.-P., (1993). *Late Archaean thrusting in the northwestern Pontiac Subprovince, Canadian Shield*, *Precambrian Research*, 61: 51-66.
- Card, K.D. et Ciesielski, A., (1986). *Subdivisions of the Superior Province of the Canadian shield*, *Geoscience Canada*, 13 (1): 5-13.
- Corfu, F., Jackson, S.L., et Sutcliffe, R.H., (1991). *U-Pb age and tectonic significance of late Archean alkalic magmatism and nonmarine sedimentation: Timiskaming Group, southern Abitibi belt, Ontario*, *Can. J. Earth Sci.*, 28: 489-503.
- Dimroth, E., Imreh, L., Goulet, N. et Rocheleau, M., (1983). *Evolution of the south-central segment of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part III: Plutonic and metamorphic evolution and geotectonic model*, *Can. J. Earth Sci.*, 20: 1374-1388.
- D'Amours, I. et Intissar, R., (2012). *Levé magnétique hélicoptéré dans le secteur de Malartic, Abitibi*, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, DP 2012-04, 6 pages, 2 cartes.
- Davis, D.W., (2002). *U-Pb geochronology of Archean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics*, *Precambrian Research*, 115: 97-117.
- Derry, D.R., (1939). *The geology of the Canadian Malartic gold mine, N. Quebec*, *Economic Geology*, 34: 495-523.
- De Souza, S., Dubé, B., McNicoll, et al., (2015). *Geology, hydrothermal alteration, and genesis of the world-class Canadian Malartic stockwork-disseminated Archean gold deposit, Abitibi, Quebec*, Dans: *Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, Éditeurs: B. Dubé and P. Mercier-Langevin, Geological Survey of Canada, Open File 7852: 113-126.
- Desrochers, J. P., Hubert, C., Pilote, P., (1996). *Geologie de la région de Val-d'Or – Malartic*; Ministère des Ressources naturelles du Québec, ET 96-01, 129 pages.

- Dimroth, E., Imreh, L., Goulet, N. et Rochelbau, M., (1983). *Evolution of the south-central segment of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part II: Tectonic evolution and geomechanical mode*, Canadian Journal of Earth Sciences, 20: 1355-1373.
- Eakins, P.R., (1962). *Caractères géologiques des gisements aurifères du district de Malartic, comté d'Abitibi-Est*, Ministère des richesses naturelles du Québec, RG 099, 143 pages, 3 cartes.
- Fallara, F, Ross, P.-S. et Sansfaçon, R., (2000). *Caractérisation géochimique, pétrographique et structurale : nouveau modèle métallogénique du camp minier de Malartic*, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, MB 2000-15, 155 pages, 2 cartes.
- Feng, R. - Kerrich, R. - McBride, S. - Farrar, E., (1992). *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the thermal history of the Archean Abitibi greenstone belt and the Pontiac Subprovince: implications for terrane collision, differential uplift, and overprinting of gold deposits*, Can. J. Earth Sci., 29: 1389-1411.
- Gariépy, C., Allègre, C.J. et Lajoie, J., (1984). *U-Pb systematics in single zircons from the Pontiac sediments, Abitibi greenstone belt*, Can. J. Earth Sci., 21: 1296-1304.
- Ghassemi, M.R., (1996). *Tectonic evolution of the Late Archean Pontiac Subprovince, Superior Province, Canada: Structural, metamorphic, and geochronological studies*, thèse de Ph.D. non publiée, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario.
- Goulet, N., (1978). *Stratigraphy and structural relationships across the Cadillac-Larder Lake fault, Rouyn-Beauchastel area, Quebec*, Thèse de Ph.D. non publiée, Université Queen's, Kingston, Ontario.
- Goodwin, A.M., (1977). *Archean basin-craton complexes and the growth of Precambrian shields*, Can. J. Earth Sci., 14: 2737-2759.
- Gunning, H.C. et Ambrose, J.W., (1943). *Région de Malartic, Québec*, Mémoire 222, Commission Géologique du Canada.
- Holubec J., (1972). *Lithostratigraphy, structure and deep crustal relations of Archean rocks of the Canadian Shield, Rouyn-Noranda area, Quebec*, Krystalinikum, 9: 63-89.
- 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, MM 82-04, 72 pages.
- Imreh, L., (1991). *Cartes préliminaires au 1:15 840 de l'Abitibi-Est méridional, coupure 32D01*, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; MB 90-37, 19 pages, 4 cartes annotées (échelle 1/15 840).
- Jolly, W.T., (1976). *Metamorphic history of the Archean Abitibi Belt: sample distribution and partial metamorphic zonation*, dans: *Report of activities. Part A*, Éditeur : Blackadar, R.G., Commission Géologique du Canada, vol. 77-1A, pages 191-196.

- Jolly, W.T., (1978). *Metamorphic history of the Archean Abitibi Belt*, dans: *Metamorphism in the Canadian shield*, Éditeurs: Fraser, J.A. et Heywood, W.W., Commission Géologique du Canada, vol. 78-10, pages 63-78.
- Kalliokoski, J., (1987). *The Pontiac problem, Quebec-Ontario, in the light of gravity data*, Can. J. Earth Sci., 24: 1916-1919.
- Latulippe, M., (1976). *La région de Val-d'Or - Malartic dans le Nord-ouest Québécois, Excursion géologique Val-d'Or – Malartic*, Ministère des Richesses naturelles du Québec, DP-367, pages 3-28.
- Lajoie, J. et Ludden, J., (1984). *Petrology of the Archean Pontiac and Kewagama sediments and implications for the stratigraphy of the southern Abitibi belt*, Can. J. Earth Sci., 21: 1305-1314.
- Ludden, J. et al., (1993). *A three dimensional perspective on the evolution of Archaean crust: LITHOPROBE seismic reflection images in the southwestern Superior province*, Lithos, 30: 357-372.
- Machado, N, Gariépy, C, Philippe, S, et David, J., (1991a). *Géochronologie U-Pb du territoire québécois : Fosses de l'Ungava et du Labrador, Province de Grenville et Sous-provinces de Pontiac - Rapport Intérimaire du Geotop*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles; MB 91-07, 50 pages.
- Machado, N, David, J, Carignan, J, Zhang, Q. et Gariépy, C., (1991b). *Géochronologie U-Pb du territoire québécois : Fosses de l'Ungava et du Labrador, Province de Grenville et Sous-provinces de Pontiac et de l'Abitibi*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles; GM 59899, Geotop-Université du Québec à Montréal, 47 pages.
- Machado, N., Rive, M., Gariépy, C. et Simard, A., (1991c). *U-Pb geochronology of granitoids from the Pontiac Subprovince: preliminary results*, Geological Association of Canada, Programmes avec résumés, 16: A78.
- MERN (2011). *Les principales subdivisions géologiques du Québec*, Carte, Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, [En ligne, consulté le 10/04/2017], <https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/provinces-geologiques-36x50.pdf>.
- Mortensen, J.K. et Card, K.D., (1993). *U-Pb age constraints for the magmatic and tectonic evolution of the Pontiac Subprovince, Quebec*, Can. J. Earth Sci., 30: 1970-1980.
- Mueller, W.U., Daigneault, R., Mortensen, J.K. et Chown, E.H., (1996). *Archean terrane docking: upper crust collision tectonics, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada*. Tectonophysics, 265: 127-150.
- O'Neil, J. J., (1935). *La Mine d'Or Canadian Malartic, comté d'Abitibi, Partie B*, Service des Mines du Québec, RASM 1934-B2, pages 69-95, 2 cartes.
- Pilote, P., (2013). *Géologie – Malartic*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, carte CG-32D01D-2013-01, 1 carte, échelle 1 :20 000.

- Powell, W.G., Carmichael, D.M. et Hodgson, C.J., (1995). *Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec*, Can. J. Earth Sci., 32: 787-805.
- Rive, M., Pinston, H. et Ludden, J.N., (1990). *Characteristics of late Archaean plutonic rocks from the Abitibi and Pontiac subprovinces, Superior Province, Canada*. Dans: *The northwestern Québec polymetallic belt; a summary of 60 years of mining exploration; proceedings of the Rouyn-Noranda 1990 symposium*, Éditeurs: M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.-M. Lulin, G. Riverin et A. Simard, L'Institut Canadien des Mines et de la Métallurgie, Volume Spécial 43, pages 65-76.
- Rocheleau, M. et Dimroth, E., (1985). *Petrology of the Archean Pontiac and Kewagama sediments and implications for the stratigraphy of the southern Abitibi belt: A discussion*, Can. J. Earth Sci., 22: 1374-1377.
- Robert, F., (2001). *Syenite associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada*, Mineralium Deposita, 36: 503-516.
- Sansfaçon, R., (1986). *The Malartic district*, Dans: *Structure and gold, Rouyn to Val-d'Or, Québec*, Éditeurs: C. Hubert et F. Robert. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada – Canadian Geophysical Union, Joint Annual Meeting, Ottawa 1986, Field trip Guidebook no. 14, pages 27-42.
- Sansfaçon, R. et Hubert, C., (1990). *The Malartic gold district, Abitibi belt, Quebec: Geological setting, structure and timing of gold emplacement at Malartic Gold Fields, Barnat, East Malartic, Canadian Malartic and Sladen Mines*, Dans: *La ceinture polymétallique du nord-ouest québécois*, Éditeurs: M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.-M. Lulin, G. Riverin et A. Simard, L'institut canadien des mines et de la métallurgie, Volume Spécial 43, pages 221-235.
- Schermere, R., Howell, D.G. et Jones, D. L., (1984). *The origin of allochthonous terranes: perspectives on the growth and shaping of continents*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 12: 107-131.
- Thurston, P.C., Ayer, J.A., Goutier, J. et Hamilton, M.A. (2008). *Depositional gaps in Abitibi greenstone belt stratigraphy: a key to exploration for syngenetic mineralization*, Economic Geology, 103: 1097-1134.
- Trudel, P. et Sauvé, P., (1992). *Synthèse des caractéristiques géologiques des gisements d'or du district de Malartic*, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MM 89-04, 113 pages.