

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

RÉÉVALUATION DU POTENTIEL MINÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ DE L'ANCIENNE MINE DE ST-ROBERT, BEAUCE, QUÉBEC

Par
Charlotte ATHURION

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc)
en sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Examineur interne	Lyal Harris INRS-ETE
Examineur externe	Pierre Verpaelst, Ph. D. Consultant retraité Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec
Directeur de recherche	Marc Richer-LaFlèche INRS-ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Marc Richer-LaFlèche, pour m'avoir offert ce formidable projet de maîtrise ainsi que pour son aide précieuse durant ces deux dernières années, sa passion, sa confiance, son esprit critique et minutieux et pour ses conseils et ses commentaires toujours pertinents.

Merci également à Lyal Harris et à Pierre Verpaelst pour leurs corrections, leurs commentaires judicieux et leurs suggestions.

Ce projet n'aurait jamais vu le jour sans l'aide financière de la compagnie Les MINES J.A.G. présidée par Pierre Gévry que je remercie donc grandement.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de terrain et de Saint-Robert Bellarmin : Louis-François Rinfret, Gino Fontaine, Edith Chouinard, Jean-François Boily, Vlad Antonoff, Mahamed Koita, Loulou, José, Alexandre Gatien et surtout Gaétan Gatien qui a su me supporter 12 heures par jours pendant l'été 2011.

Un merci très spécial à Gabriel Huot-Vézina qui m'a grandement aidée afin de devenir autonome (ou presque) avec le logiciel ArcGIS.

Je remercie également Suzanne Dussault pour ses conseils avisés, Arnaud de Coninck pour son aide avec le MEB, Stéfane Prémont et Philippe Girard pour m'avoir guidé dans les laboratoires. De plus, je tiens à remercier tous les professeurs, techniciens et étudiants que j'ai eu la chance de côtoyer durant ma maîtrise à l'INRS.

RESUME

L'ancienne mine de St-Robert située en Beauce au Québec a été exploitée très brièvement au cours de l'année 1958 pour l'or, l'argent, le plomb et le tungstène. L'augmentation du prix des métaux et l'existence de nouvelles technologies géophysiques ont conduit les MINES J.A.G. Ltée, détentrices des titres miniers, à demander une réévaluation de la géologie et du potentiel minéral de la propriété.

Ce gîte polymétallique de type porphyrique présente de nombreux indices de W, Ag, Pb, Zn, Bi et possiblement d'or. Il se présente sous forme de veines décimétriques de quartz minéralisées en pyrite, galène, scheelite, cosalite, bismuthinite et sphalérite associées à des dykes granodioritiques recoupant les sédiments dévoniens de la Formation de Frontenac, constitués majoritairement de litharénites.

Une compilation des données d'archives géophysiques, géochimiques et pédogéochimiques ainsi que l'examen de la géologie de la propriété, l'analyse géochimique d'échantillons de surface, et la réalisation de nouveaux levés géophysiques ont été effectués dans le but de déterminer de nouvelles cibles d'exploration, de préciser le contexte géologique et métallogénique de la région de St-Robert et d'établir de nouvelles stratégies d'exploration.

Les données géophysiques ont permis entre autres de confirmer la présence d'une intrusion granodioritique au nord-est de la propriété. Les données pédogéochimiques ont montré la présence de plusieurs zones d'intérêts, dont une zone de 500 mètres enrichie en Pb, Ag, Bi et Mo. Les données lithogéochimiques ont permis de caractériser les principales lithologies et d'évaluer le potentiel minéral des zones minéralisées.

Ces travaux font partie d'un projet conjoint entre l'INRS et la compagnie *Les Mines J.A.G Ltée*.

Mots clés : Appalaches, filons de quartz polymétallique, gîte porphyrique, méthodes d'exploration, géophysique, lithogéochimie, pédogéochimie, tungstène, bismuth, argent.

ABSTRACT

The St-Robert old mine located in Beauce, Quebec was briefly exploited in 1958 for gold, silver, lead and tungsten. The increase in metal prices and the availability of new geophysical technologies led *Les Mines JAG Ltd.*, the holder of mining rights, to request a review of the geology and mineral potential of the property.

This polymetallic deposit shows many W, Ag, Pb, Zn, Bi and possibly gold occurrences. Mineralization occurs in quartz veins with pyrite, galena, scheelite, cosalite, bismuthinite and sphalerite. Veins are associated with granodiorite dykes crosscutting Devonian sediments of the Frontenac Formation, mainly consisting in litharenite.

A compilation of geophysical, geochemical and soil geochemical archives as well as the examination of the geology of the property, the geochemical analysis of surface samples and new geophysical surveys were conducted in order to determine new exploration targets, to specify the geological and metallogenical context of the St-Robert region and to develop new exploration strategies.

Geophysical data led among other things, to confirm the presence of a porphyry intrusion northeast of the property. Soil geochemistry has shown the presence of several areas of interest including a new 500-meter zone enriched in Pb, Ag, Bi and Mo. Geochemical data was used to characterize the main lithologies and to assess the mineral potential of the mineralized zones.

This work is part of a joint project between the company *Les Mines JAG Ltd* and INRS.

Keywords: Appalachian, polymetallic quartz veins, exploration methods, porphyry deposit, geophysics, lithogeochemistry, soil geochemistry, tungsten, bismuth, silver.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	iii
Résumé.....	v
Abstract	vii
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux.....	xxv
Liste des abréviations	xxvii
Chapitre 1 : Introduction générale	1
1.1 Objectifs et méthodes	1
1.1.1 Cartographie géologique.....	2
1.1.2 Études géochimiques.....	2
1.1.3 Étude pédogéochimique	3
1.1.4 Études géophysiques.....	3
1.1.5 Étude structurale.....	4
1.1.6 Études pétrographique et métallogénique.....	4
1.2 Localisation et accès	5
1.3 Historique des travaux antérieurs	8
Chapitre 2 : Histoire et contexte géologique régionale	11
2.1 Histoire géologique régionale	11
2.2 Géologie régionale	19
2.2.1 Formation de Frontenac.....	23
2.2.2 Roches intrusives	31
2.3 Métallogénie régionale.....	35
2.3.1 Gîtes et indices aurifères	35
2.3.2 Métaux de base	36
Chapitre 3 : Géologie de la propriété St-Robert.....	41
3.1 Cartographie géologique	42
3.2 Lithologies	45
3.2.1 Roches sédimentaires	45
3.2.2 Roches ignées	47
3.2.3 Veines de quartz.....	51
3.3 Structures.....	57
3.4 Altération	62

3.4.1	Spectrométrie de réflectance (visible et proche infrarouge).....	62
3.5	Minéralisations.....	64
3.6	Implications métallogéniques.....	70
Chapitre 4	Géochimie des sols	71
4.1	Généralités sur les sols de la région	71
4.1.1	Conditions climatiques de la région.....	71
4.1.2	Dépôts de surface.....	72
4.1.3	Contexte pédologique de la région.....	73
4.2	Traitement des données	76
4.2.1	Échantillonnage	76
4.2.2	Traitement statistique préliminaire	77
4.3	Représentation spatiale des données.....	81
4.3.1	Résultats.....	82
4.3.2	Discussion	89
4.4	Analyse en composantes principales.....	94
4.4.1	Méthodes	94
4.4.2	Résultats et discussion	94
4.5	Conclusion du chapitre	98
Chapitre 5	Études géochimiques.....	101
5.1	Échantillonnage	101
5.2	Méthodes analytiques.....	103
5.2.1	Préparation des échantillons.....	103
5.2.2	Analyses	103
5.3	Transformations et validation des données.....	105
5.4	Variabilité géochimique des roches sédimentaires	106
5.4.1	Altérations des roches sédimentaires	111
5.4.2	Caractérisation géochimique des échantillons de roches sédimentaires les moins altérées	118
5.4.3	Contexte tectonique de déposition des roches sédimentaires.....	121
5.4.4	Indices d'intempérisme chimique (<i>chemical weathering</i>).....	126
5.5	Roches ignées.....	130
5.5.1	Variabilité géochimique des roches intrusives.....	130
5.5.2	Altération des granitoïdes de la propriété St-Robert.....	136
5.5.3	Contexte tectonique de mise en place des roches intrusives	138
5.6	Analyses des principales veines minéralisées	142
5.6.1	Zone Sud	142
5.6.2	Zone Centre.....	148
5.6.3	Zone Nord.....	152
5.7	Analyses radiométriques	157

5.8 Conclusion du chapitre	159
Chapitre 6 : Géophysique.....	161
6.1 Travaux antérieurs.....	161
6.1.1 Levé de sismique réfraction	162
6.1.2 Levé magnétométrique	169
6.1.3 Levé électromagnétique TBF (VLF)	182
6.1.4 Levés de résistivité électrique et de polarisation provoquée.....	193
6.2 Nouvelles données	218
6.2.1 Levé gravimétrique	218
6.2.2 Levé audiomagnétotellurique	237
6.3 Discussion des données géophysiques	248
Chapitre 7 : Discussion	255
7.1 Synthèse des observations.....	255
7.1.1 Géologie générale	255
7.1.2 Altérations - minéralisations	256
7.1.3 Pédogéochimie	257
7.1.4 Géochimie des zones minéralisées.....	258
7.1.5 Lithogéochimie.....	260
7.1.6 Géophysique.....	261
7.2 Potentiel minéral de la propriété St-Robert	266
7.3 Nouvelles cibles d'exploration sur la propriété St-Robert	271
7.3.1 Priorité élevée.....	271
7.3.2 Priorité moyenne.....	272
7.3.3 Faible priorité	272
Conclusion	275
Références	277

ANNEXES.....En pochette

Annexe A : Liste des concessions minières couvrant la propriété St-Robert

Annexe B-1 : Résultats de l'étude spectrométrique

Annexe B-2 : Résultats des analyses réalisées au système EDS du microscope électronique à balayage (MEB)

Annexe C-1 : Graphiques des fréquences cumulées pour chaque élément et chaque horizon de sol

Annexe C-2 : Cartes krigées des concentrations brutes et des concentrations relatives en Au, Ag, Bi, Pb, Mo et WO₃

Annexe D-1 : Coordonnées géographiques (UTM-NAD83-Zone 19) des échantillons

Annexes D-2 : Résultats des analyses géochimiques

- Annexe D-2-a : Résultats des analyses géochimiques pour l'échantillonnage systématique
- Annexe D-2-b : Résultats des analyses géochimiques pour l'échantillonnage en rainure
- Annexe D-2-c : Résultats des analyses géochimiques de l'échantillonnage de l'affleurement principal de la zone Centre

Annexe D-3 : Résultats des analyses géochimiques des sédiments associés aux métavolcanites de la rivière Clinton (Chevé, 1990)

Annexe D-4 : Reproductibilité, limites de détection, standards, dupliques et blancs analytiques

Annexe D-5 : Valeurs de normalisation du manteau primitif et des chondrites de type C1 selon Sun et McDonough (1989)

Annexe D-6 : Valeurs des principaux index d'altération

Annexe E-1 : Susceptibilité magnétique des roches de l'affleurement de la zone Centre

Annexe E-2 : Densité des roches de St-Robert

Annexe E-3 : Cartes des solutions d'Euler

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Localisation géographique de la propriété de St-Robert..	5
Figure 1.2 : Localisation de la propriété de St-Robert et des concessions minières la composant.....	6
Figure 1.3 : Itinéraire entre le village de Saint-Robert Bellarmin et l'ancienne mine de St-Robert.	7
Figure 1.4 : Emmanuel Lachance, gardien de la propriété devant le moulin de la <i>St-Robert Metals Corp.</i> en 1957..	9
Figure 1.5 : Site de la mine de la <i>St-Robert Metals Corp.</i> en 1957.....	10
Figure 2.1 : Localisation de la propriété St-Robert	11
Figure 2.2 : Précambrien – Cambrien : Ouverture de l'océan Iapetus.	12
Figure 2.3 : Cartes schématiques séquentielles illustrant l'histoire de la marge Laurentienne néoprotérozoïque- paléozoïque précoce.....	13
Figure 2.4 : Ordovicien inférieur : début de fermeture de l'océan Iapetus. Création du complexe d'îles en arc d'Ascot-Weedon..	14
Figure 2.5 : Ordovicien moyen : collision de l'arc insulaire avec le continent Laurentia..	14
Figure 2.6 : Carte géologique régionale du nord des Appalaches	16
Figure 2.7 : Silurien moyen.	17
Figure 2.8 : Représentation schématique de l'avancée de l'orogénèse acadienne entre l'Eifélien précoce et le Ludlovien.....	18
Figure 2.9 : Carte géologique des Appalaches de la région de St-Robert et légende.....	20
Figure 2.10 : Coupe schématique de la région de l'Estrie-Beauce au sud-est des Appalaches du Québec.....	22
Figure 2.11 : Carte litho tectonique d'une partie du Vermont, du New Hampshire, du Maine et du Québec.....	23
Figure 2.12 : Différentes échelles stratigraphiques proposées pour les unités lithologiques ordoviciennes à dévoniennes de la région.	24

Figure 2.13 : Échelle des temps géologiques centrée sur la période orogénique appalachienne..	26
Figure 2.14 : Spectres des terres rares normalisés aux valeurs chondritiques des volcanites de Frontenac-Chartierville.	28
Figure 2.15 : Diagramme de provenance des roches sédimentaires.	29
Figure 2.16 : Répartition géographique des différents plutons granitiques dévoniens et crétacés de la région de Saint-Robert Bellarmin..	32
Figure 2.17 : Graphiques en toile d'araignée pour les différents plutons dévoniens de la région du Lac Mégantic..	33
Figure 2.18 : Signature isotopique de feldspaths potassiques provenant d'intrusions granitiques dévoniennes et de galènes extraites des filons liés à ces intrusions..	34
Figure 2.19 : Carte de localisation des principaux gîtes de sulfures massifs de la Formation de Frontenac (Clinton).	37
Figure 2.20 : Carte des indices minéralisés et des gisements de la région du lac Mégantic.	40
Figure 3.1 : Matrice topographique du secteur de la propriété de St-Robert.....	41
Figure 3.2 : Répartition des affleurements rocheux visibles sur la propriété St-Robert.	43
Figure 3.3 : Carte de compilation de la géologie centrée sur les zones affleurantes de la propriété.	44
Figure 3.4 : Grès massif photographié à partir de l'échantillon SR07 de la zone Centre.....	46
Figure 3.5 : Argilite plissée photographiée à partir de l'échantillon SR11 de la zone Centre.....	46
Figure 3.6 : Dyke porphyrique quartzo-feldspathique de type (1) et son enveloppe d'altération météorique..	48
Figure 3.7 : Dyke porphyrique quartzo-feldspathique de type (1)..	48
Figure 3.8 : Rhyolite blanchâtre intensément séricitisée et silicifiée de type (2).....	49
Figure 3.9 : Carte du champ magnétique total (nT.m) après intégration verticale.....	50
Figure 3.11 : Veines de quartz principales de la zone Sud.	52
Figure 3.10 : Affleurement principal de la zone Centre.....	53
Figure 3.12 : Principales veines de quartz de la zone Centre.....	54

Figure 3.13 : Veines 21 et 22 de la zone Nord..	55
Figure 3.14 : Veine 24 de la zone Nord.....	56
Figure 3.15 : Schistosité de fracture et plis dans les grès massifs de l’affleurement principal de la zone Centre.	58
Figure 3.16 : Diagramme de rose pour les mesures des directions des veines des zones Centre et Nord (à gauche), pour les mesures des directions des veines de la zone Sud (au milieu) et pour les schistosités des affleurements (à droite).....	59
Figure 3.17 : Stéreonets de Wulff (hémisphère inférieur).....	60
Figure 3.18 : Plans de schistosités mesurés sur les affleurements rocheux de la propriété St-Robert.....	61
Figure 3.19 : Pyritisation intense d’un échantillon d’argilite provenant de l’extrémité nord-ouest de la propriété.....	62
Figure 3.20 : Exemple d’un spectre visualisé à l’aide du logiciel TSG7 pour l’échantillon SR13 contenant de la muscovite.	63
Figure 3.21 : À gauche : Veine subhorizontale, zone Sud. À droite : Veine de quartz minéralisée de la zone Centre..	65
Figure 3.22 : Paragénèse minérale établie par Cattalani (1987).....	66
Figure 3.23 : Schéma décrivant la zonation chimique dans le cas des porphyres à Sn-W.....	67
Figure 3.24 : Scheelite de l’échantillon SR10 en lumière transmise polarisée analysée (gauche) et en lumière polarisée non analysée (droite).	68
Figure 3.25 : À gauche : Scheelite de l’échantillon SR10 au microscope polarisant avec une lumière fluorescente. À droite : photographie d’une roche issue d’un dyke quartzo-feldspathique minéralisé.	68
Figure 3.26 : À gauche : Échantillon SR09 de la zone Centre montrant de la cosalite, de la pyrite, de la galène et de la sphalérite. Lumière réfléchie. À droite : Veine de quartz de la zone Nord contenant de la cosalite et de la pyrite.....	68
Figure 3.27 : Photographie montrant une déstabilisation de la sphalérite (<i>sphalerite disease</i>)..	69
Figure 4.1 : Carte de distribution des domaines climatiques pour l’Amérique du Nord.	72

Figure 4.2 : Carte des dépôts de surface de la Beauce et d'une partie de la région de Québec..	73
Figure 4.3 : Schéma du processus de formation d'un podzol..	74
Figure 4.4 : Carte de classification des ordres de sols de la région de la Beauce..	75
Figure 4.5 : Carte de localisation de l'échantillonnage des sols réalisé sur trois différents horizons.....	76
Figure 4.6 : Graphique représentant les moyennes des concentrations pour chaque élément en fonction des horizons de sol B, A3 et A1.....	77
Figure 4.7 : Graphique de la fréquence cumulée pour le plomb dans l'horizon de sol B.....	79
Figure 4.8 : Graphique représentant les moyennes des concentrations relatives de chaque élément en fonction des horizons de sol B, A3 et A1.	81
Figure 4.9 : Carte d'abondance relative du Pb dans le sol.....	82
Figure 4.10 : Carte d'abondance relative de l'Ag dans le sol.....	83
Figure 4.11 : Carte d'abondance relative de l'Au dans le sol.....	84
Figure 4.12 : Carte d'abondance relative du Bi dans le sol d'après la méthode de Tukey (1977).	84
Figure 4.13 : Histogramme de la fréquence en fonction des concentrations brutes de Bi (ppm) pour tous les horizons échantillonnés.	85
Figure 4.14 : Graphiques des concentrations en Bi (ppm) pour les horizons A1, A3 et B..	86
Figure 4.15 : Carte des abondances relatives du Bi dans le sol après modification du seuil de normalisation..	87
Figure 4.16 : Carte des abondances relatives du WO ₃ dans le sol..	88
Figure 4.17 : Carte des abondances relatives du Mo dans le sol.....	89
Figure 4.18 : Carte de compilation des zones enrichies en Ag, Pb, Au, Bi et Mo.....	90
Figure 4.19 : Graphique représentant les concentrations en Au (ppb) en fonction de l'Ag (ppm) issues des analyses lithogéochimiques des échantillons provenant de forages de la zone Centre réalisés par les <i>Mines J.A.G Itée</i> (bleu) et la <i>St-Robert Metals Corp.</i> (rouge).	91

Figure 4.20 : Carte de compilation montrant la zone de sol enrichie en or, la concentration en Au des sédiments de ruisseaux (MRNF) ainsi que la zone Centre présentant des minéralisations en or selon les données historiques..	93
Figure 4.21 : Représentation graphique des valeurs propres (bar bleu) et variabilités cumulées (courbe rouge) pour les différents axes.....	95
Figure 4.22 : Cercles de corrélation entres les variables Au, Mo, Bi, Pb, Ag, WO_3 et les composantes principales F1, F3 et F4.	96
Figure 4.23 : Cercles de corrélations entres les variables Au, Mo, Bi, Pb, Ag, WO_3 et les composantes principales F1, F2, F3 et F4.	97
Figure 5.1 : Plan de localisation des échantillons ramassés à la main sur la propriété de St-Robert.....	102
Figure 5.2 : Diagrammes de variation des abondances en éléments majeurs (oxydes %) en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert).....	107
Figure 5.3 : Diagrammes de variation des abondances en éléments traces (ppm) en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert).....	109
Figure 5.4 : Diagrammes de variation des abondances en métaux de base et autres métaux en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert).....	110
Figure 5.5 : A) Diagramme Ce/Sr vs CaO/MgO montrant l'effet de la carbonatation des roches sédimentaires sur les valeurs de ces rapports. B et C) diminution des valeurs de l'indice d'altération d'Ishikawa (A.I.) et al. (1976) avec l'accroissement de la carbonatation des roches sédimentaires de St-Robert.....	112
Figure 5.6 : A) Diagramme Rb/Cs vs Al_2O_3 montrant un vecteur d'altération potassique affectant préférentiellement les roches sédimentaires gréseuses. B) Fractionnement du rapport Ca/Sr suggérant une carbonatation secondaire et inorganique (haute température) des roches gréseuses de la propriété St-Robert.....	114
Figure 5.7 : Méthode des isocones de Grant (1986).....	115
Figure 5.8 : Diagrammes de gain et de perte de masse pour les éléments majeurs (A) et traces (B) des roches sédimentaires gréseuses de la propriété St-Robert.	117

Figure 5.9 : Classification des grès terrigènes et des shales d'après Herron (1988).....	119
Figure 5.10 : Classification des grès terrigènes d'après Herron (1988).	120
Figure 5.11 : Photographies des échantillons de grès SR07 (à gauche) et SR09 (à droite) en lumière polarisée.	120
Figure 5.12 : A) et B) : Diagrammes discriminants pour les grès d'après Bhatia (1983). C) : Diagrammes discriminants d'environnement tectonique pour les roches sédimentaires détritiques d'après Roser et Korsch (1986). D) : Diagramme discriminant pour les grès d'après Bhatia (1983). E) : Diagramme discriminant pour la provenance des roches détritiques d'après Roser et Korsch (1988).....	123
Figure 5.13 : Diagrammes ternaires de discrimination pour les grauwackes d'après Bhatia et Crook (1986).....	124
Figure 5.14 : Spectres des terres rares normalisées aux valeurs de Sun et McDonough (1989) pour les roches sédimentaires de type grès et shales de la propriété de St-Robert.	125
Figure 5.15 : Diagramme du rapport CaO/MgO, représentatif de la carbonatation secondaire, en fonction de l'indice d'altération chimique.....	128
Figure 5.16 : Diagrammes de gain et perte de masse issus de la méthode des isocones de Grant pour les enveloppes d'altération météorique des roches sédimentaires de la propriété St-Robert.	129
Figure 5.17 : Spectres des terres rares normalisées aux valeurs des chondrites de types C1 définies par Sun et McDonough (1989).....	131
Figure 5.18 : Diagrammes de variations des concentrations en oxydes des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction des concentrations en SiO ₂	133
Figure 5.19 : Diagrammes de variation des concentrations en MgO (%pds) des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction de l'indice de différenciation de Segerstrom et Young (1972).....	134
Figure 5.20 : À gauche : Diagramme de classification des roches granitiques de Barker (1979) : À droite : Diagramme de Streickeisen (1976) appliqué aux roches intrusives de St-Robert.....	135
Figure 5.21 : Diagramme de classification des roches volcaniques.....	135

Figure 5.22 : Diagrammes de variations des concentrations en oxydes des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction de l'indice d'altération d'Ishikawa et al. (1976).....	137
Figure 5.23 : A) : Diagramme de classification des séries volcaniques d'après Irvine et Baragar (1971). B) : Diagramme Rb/Zr en fonction de Nb de Brown et al. (1984) pour déterminer la maturité d'un arc volcanique. C) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Harris et al. (1986) D) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Harris et al. (1986) E) et F) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Pearce et al. (1984).	140
Figure 5.24 : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Pearce et al. (1984)....	140
Figure 5.25 : Diagrammes discriminants Nb-Y et Rb- (Nb-Y) pour les données géochimiques des plutons d'Aylmer, Mégantic, Winslow et St-Sébastien-Ste-Cécile.....	141
Figure 5.26 : Photographie des veines minéralisées V7 et V4 de la zone Sud.	143
Figure 5.27 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 4, 6 et 9 de la zone Sud.....	144
Figure 5.28 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 4, 6 et 9 de la zone Sud.....	145
Figure 5.29 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 1 et 7 de la zone Sud.....	146
Figure 5.30 : Vue oblique d'une représentation 3D des iso-valeurs en Pb (2 %), Bi (0,2 %) et Ag (200 g/t).....	147
Figure 5.31 : Photographie de la veine 32 de la zone minéralisée Centre.	148
Figure 5.32 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 32 et 34 de la zone Centre..	149
Figure 5.33 : Vue oblique d'une représentation 3D des iso-valeurs en Pb (1,5%) en violet, Bi (0,1 %) en vert, Ag (100 g/t) en rose, Au (2 g/t) en jaune, WO ₃ (0,5 %) en orange..	150
Figure 5.34 : Photographie de la veine minéralisée V24.	153
Figure 5.35 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur la partie nord-est de la veine 22 de la zone Nord.....	154
Figure 5.36 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur la partie sud-ouest de la veine 22 de la zone Nord.....	155

Figure 5.37 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectuées sur la veine 24 de la zone Nord..	156
Figure 5.38 : Profil radiométrique en thorium en fonction de la lithologie du principal affleurement de la zone Centre.....	158
Figure 6.1 : Compilation des valeurs de vitesse sismique observées dans différents matériaux géologiques.	163
Figure 6.2 : Principe de la méthode de réfraction sismique..	164
Figure 6.3 : Variabilité spatiale des valeurs de vitesse sismique (m/s)..	165
Figure 6.4 : Carte montrant la variabilité de la vitesse de propagation des ondes sismiques et les différentes lithologies observées sur la propriété. Projet St-Robert, INRS-ETE.	167
Figure 6.5 : Variabilité spatiale de la profondeur du socle rocheux. Interpolation par krigeage. Source : Projet St-Robert, INRS-ETE.	168
Figure 6.6 : Grille de mesure des levés magnétométriques et électromagnétiques.	171
Figure 6.7 : Profil des valeurs de susceptibilité magnétique mesurées le long de l'affleurement principal de la zone Centre.	172
Figure 6.8 : Carte d'interpolation par krigeage des données du champ magnétique total (après réduction au pôle). Projet St-Robert, INRS-ETE..	173
Figure 6.9 : Profil du champ magnétique total en fonction de la distance..	174
Figure 6.10 : Localisation des lignes 20E et 24E sur un fond représentant les données du champ magnétique total.	175
Figure 6.11 : Carte d'interpolation par krigeage de la dérivée verticale première du champ magnétique totale.....	176
Figure 6.12 : Carte montrant les principaux domaines magnétiques ainsi que les éléments géologiques observés sur le terrain.	178
Figure 6.13 : Représentation des relevés des forages J4 et J13.	179
Figure 6.14 : Affleurement de roches sédimentaires intensément pyritisées.	180
Figure 6.15 : Section présentant les lithologies et concentrations en argent des différents forages effectués dans la zone anomalique M10.	181

Figure 6.16 : À gauche : photographie montrant un émetteur VLF militaire (Grimeton, Suède). À droite : photographie montrant un sous-marin Trident utilisant le signal VLF	182
Figure 6.17 : Plan schématique montrant la propagation d'une onde VLF à la surface du globe..	183
Figure 6.18 : Exemple de données VLF filtrées par la méthode Fraser..	183
Figure 6.19 : Carte montrant la variabilité du champ électromagnétique sur la propriété St-Robert.....	186
Figure 6.20 : Carte de compilation des anomalies EM-TBF, magnétiques et de la géologie de la propriété..	188
Figure 6.21 : Représentation du relevé de forage J14.....	190
Figure 6.22 : Section des forages de l'anomalie M3 située dans la zone Sud.	191
Figure 6.23 : Étalement des valeurs de résistivité électrique et de conductivité électrique de différents types de roches, de sédiments glaciaires et d'eaux souterraines.	194
Figure 6.24 : Courbes de voltage en fonction du temps lors de l'injection de courants électriques.	195
Figure 6.25 : Grille de mesure du levé de polarisation provoquée effectué par Edwin Gaucher & Associées (1981).....	197
Figure 6.26 : Variabilité des données de résistivité électrique apparente, de chargeabilité et de l'indice <i>Facteur Métal</i> pour le levé de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés.	198
Figure 6.27 : Carte présentant la variabilité spatiale des données de résistivité électrique apparente interpolées par krigeage..	199
Figure 6.28 : Carte représentant les variations des valeurs de chargeabilité.....	200
Figure 6.29 : Carte représentant les variations des valeurs de l'indice <i>Facteur Métal</i>	200
Figure 6.30 : Différents domaines issus des cartes de résistivité électrique apparente, de chargeabilité et de l'indice <i>Facteur Métal</i>	202
Figure 6.31 : Carte de compilation des données de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés, de la géologie et des autres données géophysiques.	204

Figure 6.32 : Grille du levé de résistivité électrique et de polarisation provoquée de <i>Phoenix Géophysics inc.</i> (1983).	205
Figure 6.33 : Étalement des valeurs de résistivité électrique apparente pour des séparations de n=1 à 5.	206
Figure 6.34 : Cartes des valeurs de résistivité électrique apparente pour les séparations de n= 1, 2, 3, 4 et 5.	208
Figure 6.35 : Histogrammes des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour des séparations n de 1 et 5.	209
Figure 6.36 : Étalement des valeurs de chargeabilité et de l'indice Facteur Métal pour des séparations de n=1 à 5.	210
Figure 6.37 : Cartes des valeurs de chargeabilité pour n=1, 2, 3, 4 et 5.	211
Figure 6.38 : Cartes des valeurs de l'indice <i>Facteur Métal</i> pour n= 2 à 6.	213
Figure 6.39 : Carte de compilation des anomalies magnétiques, EM-TBF, de polarisation provoquée issue des levés d'Edwin Gaucher & Associés (1981) et de Phoenix Géophysics inc. (1983).	214
Figure 6.40 : Carte de compilation des anomalies magnétiques, EM-TBF, de polarisation provoquée issue du levé d'Edwin Gaucher & Associés (1981) et de Phoenix Géophysics inc. (1983).	216
Figure 6.41 : Carte détaillée des anomalies de polarisation provoquée IP4 et PP1 et de la zone anomalique en Pb-Ag et Bi du levé pédogéochimique.	217
Figure 6.42 : Gravimètre CG5 (Scintrex) utilisé pour le levé gravimétrique à St-Robert.	219
Figure 6.43 : Photographie montrant la station de base RTK ProMark 500 et la station émettrice Pacific Crest utilisées pour l'arpentage à résolution centimétrique des stations gravimétriques de St-Robert.	220
Figure 6.44 : Grille de mesure des levés gravimétriques.	220
Figure 6.45 : Figure montrant la station de base St-Robert-99999 située sur le site de l'école Bellarmin (12 rue Nadeau). Photos : Edith Chouinard, INRS	221
Figure 6.46 : Histogramme montrant la distribution des valeurs de l'anomalie de Bouguer complète du levé réalisé sur la propriété St-Robert.	222

Figure 6.47 : Carte montrant la variabilité spatiale des valeurs d'anomalie de Bouguer complète.....	224
Figure 6.48 : Carte géologique simplifiée de la région de St-Robert Bellarmin..	225
Figure 6.49 : Carte de la dérivée verticale première des valeurs de l'anomalie de Bouguer. ...	228
Figure 6.50 : Carte de compilation des failles magnétiques et sismiques avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.	230
Figure 6.51 : Carte de compilation des anomalies magnétiques avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.....	231
Figure 6.52 : Carte de compilation des anomalies EM-TBF avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.	233
Figure 6.53 : Carte de compilation des anomalies de polarisation provoquée induite avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.....	234
Figure 6.54 : Carte de compilation des zones d'intérêt pédogéochimique avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.	236
Figure 6.55 : Dispositif AMT (NSAMT) utilisé sur la propriété St-Robert.....	237
Figure 6.56 : Instruments utilisés pour le levé AMT.	240
Figure 6.57 : Schéma du dispositif du levé AMT.	240
Figure 6.58 : Représentation schématique du dispositif utilisé pour le levé AMT 2012 sur la propriété St-Robert.	242
Figure 6.59 : Carte de localisation des stations de mesure du levé audiomagnétotellurique..	243
Figure 6.60 : Section 1 - Modèle d'inversion de la résistivité électrique apparente en 2D, corrigé pour les effets statiques.....	244
Figure 6.61 : Section 2 - Modèle d'inversion de la résistivité électrique apparente en 2D, corrigé pour les effets statiques.....	246
Figure 6.62 : Compilation de la géologie simplifiée de la région et des cartes d'anomalies de Bouguer du Québec et du Maine.	249
Figure 6.63 : Carte de la variabilité de l'anomalie de Bouguer du nord du Maine et du New Hampshire et du sud du Québec.	250

Figure 6.64 : Carte montrant la variabilité du champ magnétique total dans le sud du Québec et le nord du Maine.....	251
Figure 6.65 : Localisation des profils sismiques effectués par l'USGC et Ressources Naturelles Canada.....	252
Figure 6.66 : Coupe géologique issue de l'interprétation des profils sismiques effectués par l'USGS et Ressources Naturelles Canada..	253
Figure 7.1 : Carte récapitulative des principales cibles pour d'éventuels forages sur la propriété St-Robert.	273

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Résultats d'analyses lithogéochimiques effectuées pour Eugène Larochelle (1933)	8
Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des valeurs de bruit de fond obtenues par la méthode de Tukey (1977) et par la méthode de la fréquence cumulée des différents éléments pour les horizons de sol A1, A3 et B.	80
Tableau 4.2 : Valeurs propres, variabilité et pourcentage de variabilité cumulée pour les différents axes.	94
Tableau 4.3 : Matrice des corrélations entre les différents éléments chimiques.	95
Tableau 5.1 : Répartition des échantillons dans les différents groupes d'affinités chimiques.	131
Tableau 5.2 : Moyenne et écart-type des concentrations équivalentes en thorium (ppm) dans les dykes porphyriques et les roches sédimentaires déterminées à l'aide du radiomètre.	157
Tableau 6.1 : Valeurs de susceptibilité magnétique pour différents types de matériaux.	170
Tableau 6.2 : Valeurs de chargeabilité observées pour des minéraux (1 % en volume de la roche) et pour différents milieux, pour un temps d'investigation de 0,02 à 1 seconde.	196
Tableau 6.3 : Valeurs de densité moyenne pour les différents types de roche de la propriété St-Robert.	226
Tableau 6.4 : Récapitulation des observations réalisées sur la géophysique de la propriété St-Robert.	246
Tableau 7.1 : Tableau récapitulatif des ressources historiques calculées par Lacombe (1958).	267

LISTE DES ABREVIATIONS

g/t	Gramme par tonne
Ma	âge en millions d'années
Mt	Million de tonnes
VMS	Sulfures massifs volcanogènes
SEDEX	Sédiments exhalatifs
Pl	Plagioclases
Qz	Quartz
Or	Orthose
Gn	Galène
Py	Pyrite
Sch	Scheelite
Co	Cosalite
N	Indice structural
n	nombre d'échantillons
fO ₂	fugacité d'oxygène
MRNFQ	Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec
SCVG	Synclinorium de Connecticut Valley - Gaspé
conc. max.	concentration maximale
IRDA	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
VLF-TBF	Very Low Frequency – Très Basses Fréquences
EM-TBF	Électromagnétique à Très Basses Fréquences
AMT	Audiomagnetotellurique
NSAMT	Natural Source Audiomagnetotelluric
REM	Signal Rémanent Électromagnétique
REA	Résistivité Électrique Apparente

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE

L'ancienne mine de St-Robert, située dans les Appalaches, a été exploitée très brièvement au cours de l'année 1958 pour le plomb, l'argent, l'or et le tungstène et a été la cible de nombreux travaux d'exploration qui se sont poursuivis jusqu'en 1984.

Ce gisement, de type filonien polymétallique assez rare dans les Appalaches, contient de nombreux indices de Pb, Ag, W, Bi, Zn et possiblement d'or. Il se présente sous forme de veines décimétriques de quartz minéralisées en galène argentifère (PbS), pyrite (FeS₂), scheelite (CaWO₄), cosalite (Pb₂Bi₂S₅), sphalérite (ZnS) et molybdénite (MoS₂). Ces veines sont associées à des dykes granodioritiques recoupant les roches sédimentaires dévoniennes de la Formation de Frontenac. Ces roches sédimentaires sont considérées comme une séquence de turbidites clastiques constituée d'une alternance de grès, de siltstones, de schistes argileux et d'ardoises.

Les travaux présentés dans ce mémoire font partie d'un projet conjoint entre l'INRS et la compagnie Les Mines J.A.G Ltée, détentrice des titres miniers.

1.1 Objectifs et méthodes

Compte tenu de l'accroissement soutenu de la demande en métaux des marchés asiatiques en pleines croissances, les sociétés d'exploration minière sont de plus en plus actives pour valoriser le potentiel minéral des différentes régions du Québec. Plus spécifiquement, en fonction de la conjoncture économique favorable, les Mines JAG Ltée ont décidé de réactiver le projet de minéralisations polymétalliques de St-Robert (Beauce Sud).

Ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans une problématique d'intégration globale de données géoscientifiques multiples spatialisées et interprétées dans le but d'optimiser les stratégies d'exploration pour une catégorie de gîtes atypiques et donc très peu documentés dans la littérature scientifique. En plus d'une cartographie géologique de base, nous avons intégré une multitude de données pédogéochimiques, lithogéochimiques et géophysiques anciennes et récentes. Ce mémoire porte principalement sur l'exploration minérale, car le volet gîtologique a été en grande partie étudié dans le cadre du mémoire de maîtrise de Cattalani (1987).

En l'absence de carottes de forage, les travaux de réévaluation, qui ont commencé en août 2010, se sont concentrés sur la compilation des données d'archives datant de 1914 à 1986, l'examen de la géologie de la propriété, le prélèvement et l'analyse géochimique d'échantillons des roches prélevées à la surface, ainsi que sur la réalisation de nouveaux levés géophysiques.

1.1.1 Cartographie géologique

Les travaux de terrain ont été réalisés entre les mois de mai et août 2011 dans le cadre d'une collaboration entre l'INRS et la compagnie minière Les Mines J.A.G. Ltée. Une surface d'environ 15 kilomètres carrés a été cartographiée à l'aide des 20 nouvelles lignes orientées NNO-SSE qui ont été coupées à travers les zones boisées de la propriété. La cartographie avait pour but de détailler la géologie locale et de recueillir des données lithogéochimiques, radiométriques et structurales afin de se faire une idée plus précise des lithologies et des minéralisations. De plus, les cartes géologiques d'archives n'ayant pas de coordonnées GPS, un arpentage des principales veines de quartz et des dykes a été effectué à l'aide d'un GPS Garmin Map 62 et d'un système GPS-RTK (PROMARK 500).

Une cartographie détaillée a également été réalisée sur les principaux affleurements visibles sur la propriété ainsi que sur les tranchées recoupant les veines minéralisées des zones Sud, Centre et Nord. Ces travaux avaient pour principal objectif l'étude des relations entre les minéralisations et la structure.

1.1.2 Études géochimiques

Lors des travaux de terrain 2011, plus de 250 échantillons ont été prélevés. Cet échantillonnage a consisté en un prélèvement à la main d'environ 80 spécimens de roches ainsi qu'un échantillonnage par rainurage (à la scie à diamant) des principales veines minéralisées et de leurs épontes.

Ces échantillons ont ensuite été analysés à l'aide de l'ICP-MS, de l'ICP-AES et de l'activation neutronique instrumentale (INAA). Ces analyses devaient permettre de caractériser géochimiquement les principales lithologies et d'évaluer le potentiel minéral des zones minéralisées. Les résultats de cette étude sont présentés dans le chapitre 5.

Des levés radiométriques locaux (102 mesures de K (%), eU (ppm) et eTh (ppm)) et deux sections radiométriques réalisées sur l’affleurement principal de la zone Centre et sur un affleurement situé entre la zone Sud et la zone Centre ont également été effectués. Ces résultats sont brièvement présentés dans le chapitre 5.

Un levé radiométrique mobile couplé à un DGPS (Système de positionnement global différentiel) a été réalisé sur les principaux chemins de la propriété, cependant, compte tenu de la largeur des chemins et de l’utilisation de remblais importés d’autres régions, ces résultats ne sont pas exploitables et ne seront donc pas présentés dans ce mémoire.

De plus, les roches recueillies ont été examinées à l’aide du système spectrométrique ASD TerraSpec (spectrométrie en longueur d’onde du visible au proche infrarouge) afin de déterminer les assemblages minéralogiques argileux présents dans les roches de la propriété (chapitre 3) et de caractériser les principales altérations hydrothermales. Le logiciel TSG 7 nous a permis d’interpréter plus simplement les spectres obtenus.

1.1.3 Étude pédogéochimique

Au début des années 80, des levés de géochimie des sols ont été effectués pour la compagnie Les MINES J.A.G. Ltée. Au total, 584 échantillons de sols ont été prélevés couvrant environ 20 kilomètres de ligne sur la propriété St-Robert.

À partir des cartes d’archives fournies par la compagnie Les Mines J.A.G. Ltée, nous avons recompilé numériquement et géoréférencé les données à partir des cartes d’abondances d’éléments dans les sols. Ces données ont été superposées à la géologie, la géophysique et la géochimie de la propriété. À l’aide du logiciel XLSTAT, nous avons également réalisé des analyses en composantes principales pour visualiser statistiquement les différentes associations métalliques (chapitre 4).

1.1.4 Études géophysiques

La numérisation des données géophysiques provenant des anciennes cartes a été effectuée dans le but de réaliser de nouvelles cartes géophysiques et de créer une base de données géoréférencée, en intégrant les informations provenant des données géologiques, géochimiques et pédogéochimiques (chapitre 6).

Ces travaux complètent ceux réalisés par Koita (2011). De plus, l'INRS a procédé en 2011 à des levés gravimétrique (CG5-SCINTREX), magnétométrique (GSM-19) et électromagnétique en domaine de fréquence (PROMIS 10). Des levés de résistivité électrique en mode d'imagerie tomographique (ABEM) et un levé audiomagnétotellurique (Zong GDP-32 et AMT) ont été réalisés à l'hiver 2012.

Les résultats et interprétations du levé d'audiomagnétotellurique et du levé gravimétrique sont présentés dans le chapitre 6.

1.1.5 Étude structurale

Environ 600 mesures structurales ont été réalisées sur les roches et les veines de la propriété St-Robert afin de comprendre les relations liant les lithologies présentes et le mode de mise en place des veines de quartz minéralisées. Ces mesures ont ensuite été compilées sur des cartes et projetées sur des stéréonets à l'aide du logiciel StereoWin 1.2 (Richard W. Allmendinger, 2003).

Ces observations sont présentées dans le chapitre 3.

1.1.6 Études pétrographique et métallogénique

Une dizaine de lames minces issues des échantillons de l'affleurement principal de la zone Centre ont été étudiées afin de déterminer les principaux minéraux présents dans les roches sédimentaires, intrusives et minéralisées de la propriété et de caractériser le type de gisement (chapitre 3). Cet examen a également permis la réévaluation de la paragenèse présentée par Cattalani dans son mémoire de 1987.

Enfin, certains échantillons minéralisés ont été analysés à l'aide du système EDS du microscope électronique à balayage afin de déterminer la composition des minéraux métalliques (chapitre 3).

1.2 Localisation et accès

Le secteur de Saint-Robert Bellarmin est situé à 150 kilomètres au sud de la ville de Québec en passant par l'autoroute 73S et à environ 300 kilomètres à l'est de Montréal en passant par l'autoroute 10E (Fig. 1.1).

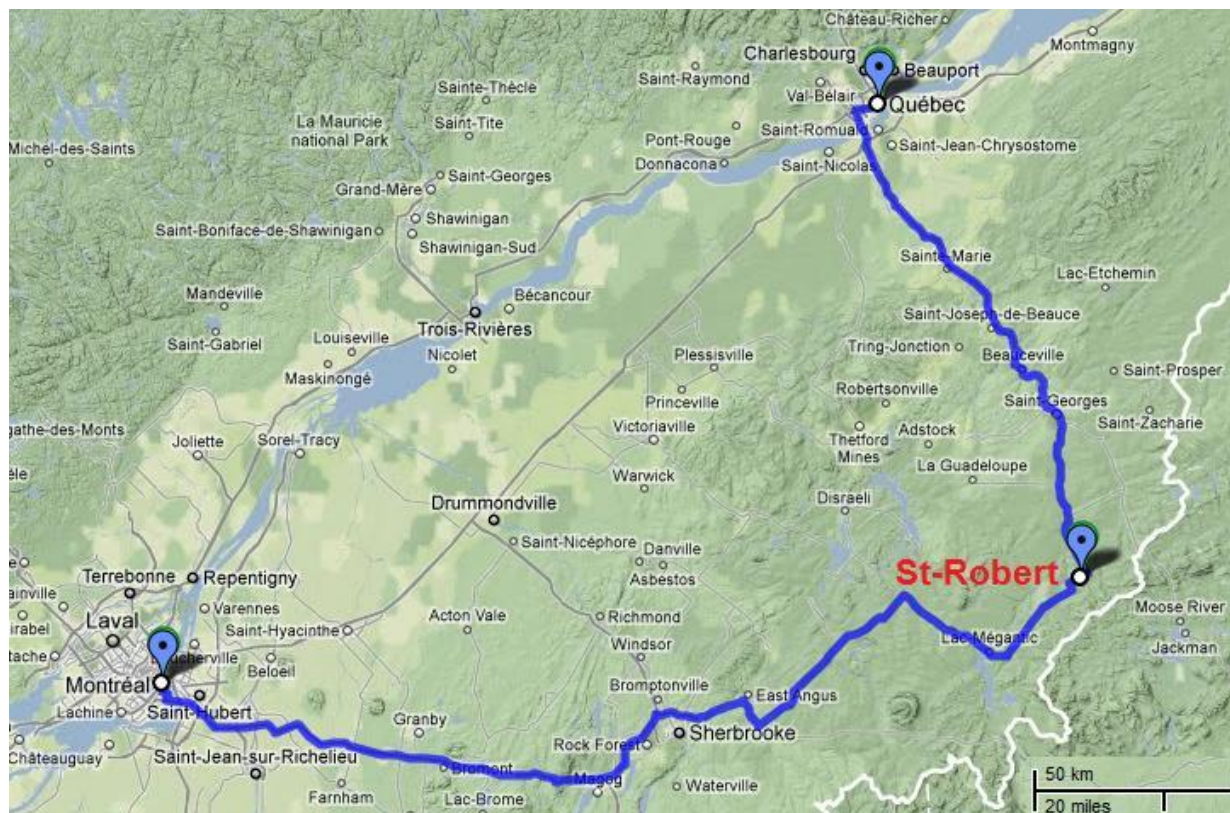


Figure 1.1 : Localisation géographique de la propriété de St-Robert. Source : Google Map.

La propriété St-Robert située à environ six kilomètres à l'Est du centre du village de Saint-Robert Bellarmin, est composée de 18 concessions minières contigües (Fig. 1.2). La liste des titres est présentée en Annexe A. La propriété a longtemps été divisée en trois zones minéralisées distinctes :

- la **zone Sud** incluse dans les concessions minières CL3497471 et CL 3651501,
- la **zone Centre** incluse dans les concessions minières CL3497471 et CL3652241,
- la **zone Nord** incluse dans les concessions minières CL3497461, CL3516081 et CL3516082.

L'accès à la propriété consiste en un chemin de rang en gravier à deux voies suivi d'un chemin d'érablière accessible toute l'année (chemin de la mine).

À partir du village de Saint-Robert Bellarmin, il faut suivre la rue Nadeau qui se prolonge par la route du Rang 8 puis tourner à droite sur la route du Rang 15 et à gauche sur le chemin de la mine. Les ruines des installations de l'ancienne mine de St-Robert sont observables au bout du chemin de la mine (Fig. 3) et les trois principales zones minéralisées sont accessibles en VTT.

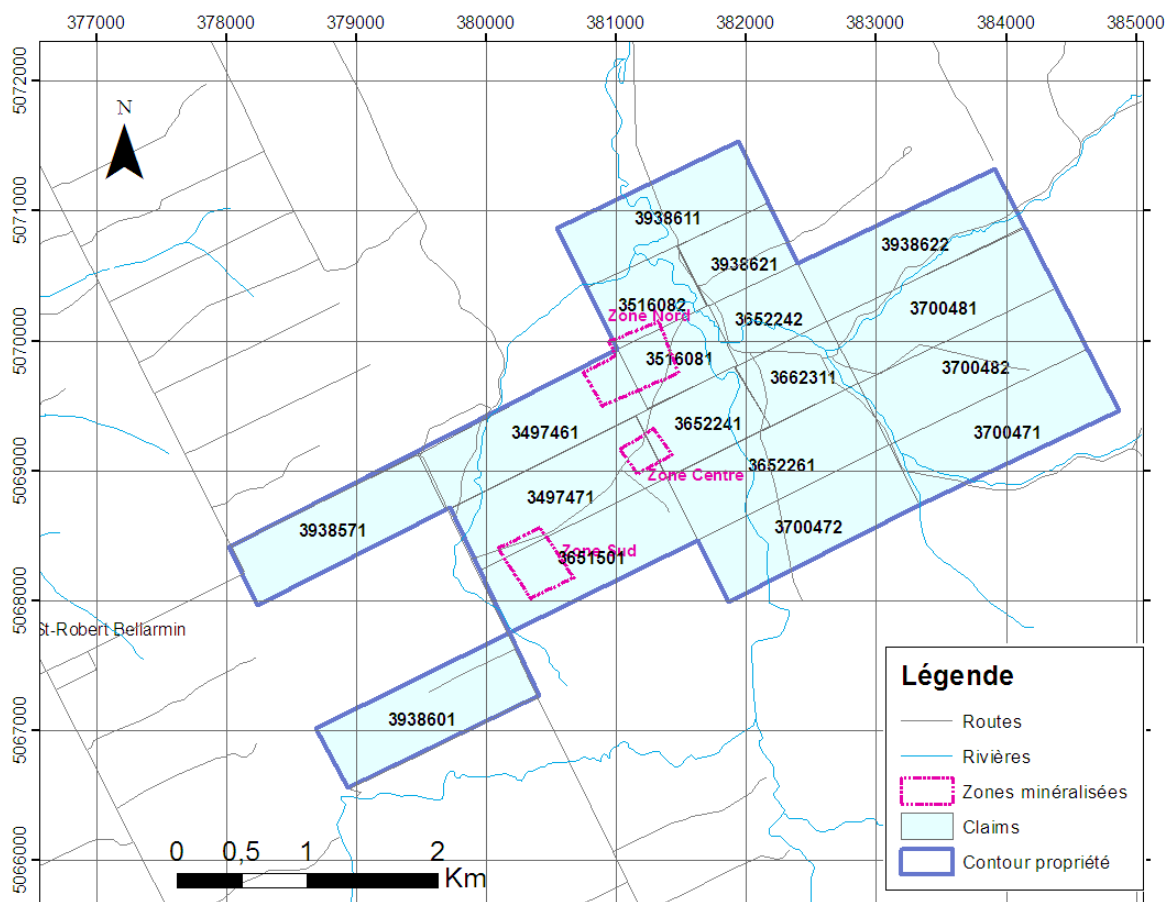


Figure 1.2 : Localisation de la propriété de St-Robert et des concessions minières la composant. Coordonnées UTM, NAD 1983, zone 19 N.

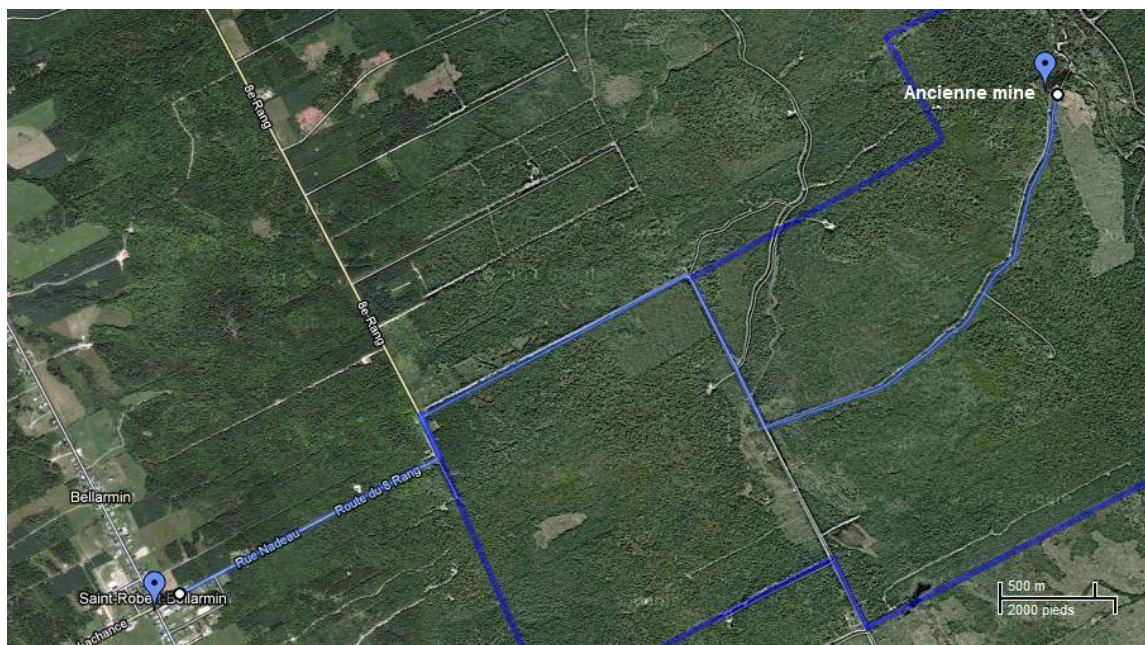


Figure 1.3 : Itinéraire entre le village de Saint-Robert Bellarmin et l'ancienne mine de St-Robert.
Source : Google Maps. La ligne bleu foncée représente l'ancien contour de la propriété de St-Robert, la ligne bleu claire, l'itinéraire à suivre.

1.3 Historique des travaux antérieurs

L'histoire de la propriété de St-Robert s'étend sur plus d'un siècle.

Peu de temps avant 1879, alors que la région de l'Estrie-Beauce subissait la deuxième ruée vers l'or, des prospecteurs à la recherche de placers sur la rivière du Loup (ou Linière) découvrent des filons de quartz à galène argentifère et or. De 1879 à 1885, on y fait de l'extraction avec la construction du tunnel Lacombe de la zone Centre ainsi que plusieurs autres puits et tranchées (Ells, 1887). Onze ans après la découverte de ces filons, du tungstène est découvert sur la propriété, et ce pour la première fois au Canada (Walker, 1913).

À cause de l'importance du mort-terrain dans cette région, le travail d'exploration est arrêté, jusqu'à ce qu'en 1933, Mr Andrea Maheux redécouvre ces indices. En 1934, le géologue Eugène Larochelle obtiendra quelques résultats d'analyses géochimiques très prometteurs sur des échantillons choisis dans les différentes veines minéralisées. Le tableau 1.1 décrit ces résultats :

Tableau 1.1 : Résultats d'analyses lithogéochimiques effectuées pour Eugène Larochelle (1933)

Zones	Veines	Or (oz/t)	Argent (oz/t)	Plomb (%)	Zinc (%)
Nord	Veine n°1	traces	2,220		
	Veine n°2	traces	4,764		
		traces	0,976		
Centre	Veine n°1	0,012	19,072		
	Veine n°2	0,006	5,718		
Sud	Veine n°1	0,025	26,500	19,030	3,510

Notez qu'à l'époque, l'or ne valait que 20 \$ l'once.

Par la suite, peu de travaux ont été effectués.

À partir de 1951, la compagnie St Robert Metals Corp. voit le jour sous la direction de Paul Riverin (géologue) et entreprend des travaux d'exploration incluant entre autres la réalisation et le nettoyage de près de 1000 mètres de tranchées, la réalisation d'un levé de réfraction sismique ainsi que plus de 6000 mètres de forages. Les forages décèleront quelques très hautes valeurs en or dans la zone Centre (jusqu'à 25 oz/t sur 8 centimètres).

Puis, en avril 1958, la compagnie commence l'exploitation avec la création du tunnel Lee dans la zone Nord et la construction d'un moulin d'une capacité de 108 T/Jour (Fig. 1.4 et 1.5).

À l'origine, le tunnel Lee devait remonter jusqu'à la zone Centre sur plus de un kilomètre afin d'explorer les minéralisations des zones Nord et Centre. Cependant, dans les 150 premiers mètres, ils découvrirent une intrusion porphyrique hautement minéralisée en tungstène (0,6 %) ce qui entraîna la suspension de l'excavation.



Figure 1.4 : Emmanuel Lachance, gardien de la propriété devant le moulin de la *St-Robert Metals Corp.* en 1957. Courtoisie de Liliane Lachance.

Pendant l'année 1958, douze barils de concentrés ont été produits. Ces concentrés ont été envoyés en Allemagne. Le premier envoi de 5,4 tonnes contenait 60 % de Pb, 350 - 400 oz/t d'Ag, 0,1 - 0,5 oz/t d'Au et de 4 à 5 % de Bi. A ce moment-là, le concentré de minerais de St-Robert valait 197,46 \$/t. La récupération était de l'ordre de 83% pour le Pb, 87% pour l'argent, 81 % pour l'or et 67 % pour le bismuth (Frédéric, 1983).



Figure 1.5 : Site de la mine de la *St-Robert Metals Corp.* en 1957 : Deux rangées d'habitation et un moulin. Tirée de Frédéric (1983).

Cependant, en octobre 1958, par faute de moyen, la compagnie se voit dans l'obligation d'arrêter l'exploitation pour une durée indéterminée. Au total, seulement 1000 tonnes de minerai seront traitées au moulin.

En 1970, Nouvelle Mining achète la propriété de St Robert Metals et effectue une campagne de géophysique ainsi que dix nouveaux sondages (2472 mètres au total).

C'est en 1977 que la compagnie Les MINES J.A.G. Ltée devient propriétaire, sous la direction d'André Noel. À partir de 1982, elle effectuera de grands travaux d'exploration totalisant plus de 10 000 mètres de forages, ainsi que le nettoyage des anciennes tranchées, la coupe de nouvelles lignes, la création de nouvelles tranchées, et plusieurs levés géophysiques (magnétométrique, V.L.F., polarisation provoquée et électromagnétique) jusqu'à l'arrêt définitif des travaux d'exploration en 1985.

Pour sa thèse de maîtrise (1987), Sergio Cattalani réalisa des analyses lithogéochimiques sur de nombreux intrusifs de la propriété ainsi que quelques déterminations thermogéochimiques sur des inclusions fluides provenant d'échantillons représentatifs des principales veines de quartz minéralisées.

CHAPITRE 2 : HISTOIRE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONALE

La caractérisation d'un gisement passe tout d'abord par la description de sa géologie et de son environnement de mise en place. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons donc retracer l'histoire géologique de la région puis, dans la deuxième partie, nous décrirons le contexte géologique régional. La détermination du contexte géologique repose sur une compilation de la littérature en rapport avec la géologie de la région et de la propriété St-Robert.

Enfin, dans la dernière partie, nous discuterons de la métallogénie régionale.

2.1 Histoire géologique régionale

La propriété St-Robert est située dans les Appalaches du sud-est du Québec (Fig. 2.1).

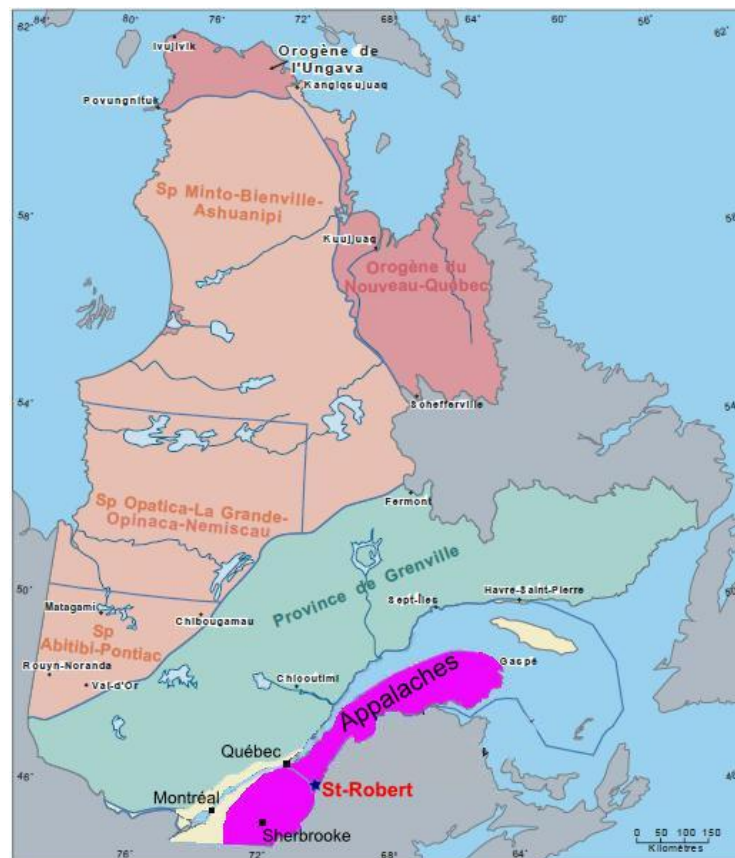


Figure 2.1 : Localisation de la propriété St-Robert. Modifiée de MRNF.

Les Appalaches sont une chaîne de montagnes s'étirant sur près de 2000 kilomètres de distance, en allant de l'Alabama (États-Unis) à Terre-Neuve (Canada).

Voici un bref aperçu de la formation de cette chaîne de montagnes :

Au Cambro-Ordovicien, le rifting du supercontinent Rodinia entraîne la formation de l'océan Iapetus. Celui-ci sépare le continent Laurentia (nord-ouest) du continent Gondwana (sud-est) (Fig. 2.2).

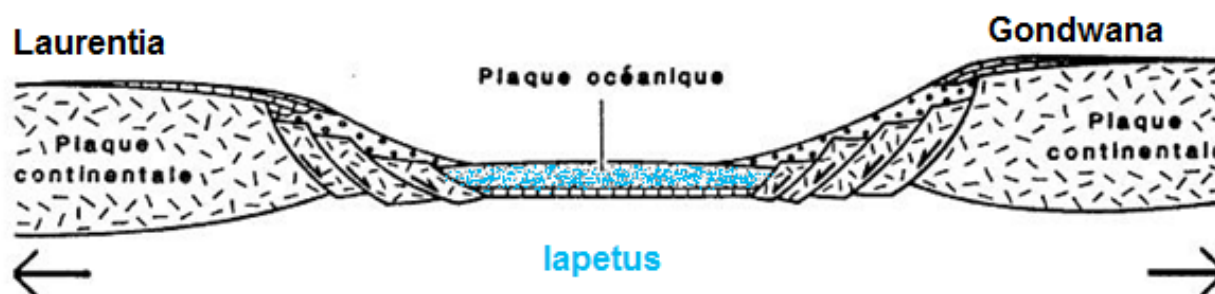


Figure 2.2 : Précambrien – Cambrien : Ouverture de l'océan Iapetus. Tirée de Gauthier et al. (1994).

Dans la région de Québec, le premier épanchement de roches volcaniques causé par le rift se serait produit vers 555-550 Ma (Allen et al., 2010; Hodych et Cox, 2007). Les roches de la Formation de Mt-Anselme témoignent de ce volcanisme. L'extension continentale est compensée par une série de failles de socle transformantes qui s'étendent jusqu'au craton et qui sont perpendiculaires à l'orientation NE-SO de la marge laurentienne (Allen et al., 2010). Ces deux systèmes de failles sont donc à l'origine des marges irrégulières du Laurentia. Des études récentes suggèrent que la formation de l'océan Iapetus se serait faite en deux étapes (Fig. 2.3; Cawood et al., 2001) : un premier épisode d'extension séparant le continent Laurentia du continent Gondwana et formant l'océan Iapetus (Fig. 2.3a), suivie d'un transfert du centre d'épanchement vers l'intérieur de la marge continentale laurentienne causant la séparation d'une bande du continent Laurentia (Fig. 2.3b et 2.3c) que l'on retrouve aujourd'hui exposée dans le massif de Chain Lakes et dans le bloc Maquereau (Cawood et al., 2001; Waldron et Van Staal, 2001).

Cette étude suggère que le massif de Chain Lakes ferait partie de la marge continentale laurentienne indiquant donc que la bordure Est de cette dernière se situerait plus à l'est du massif de Chain Lakes (De Souza et Tremblay, 2010; Pinet et Tremblay, 1995). Cette hypothèse a donc des conséquences structurales et métallogéniques importantes puisque la

propriété St-Robert se situerait sur la marge laurentienne. En comparaison, d'autres auteurs pensent que le massif de Chain Lakes serait un bloc exotique (Kusky et al. 1997; Zen 1983).

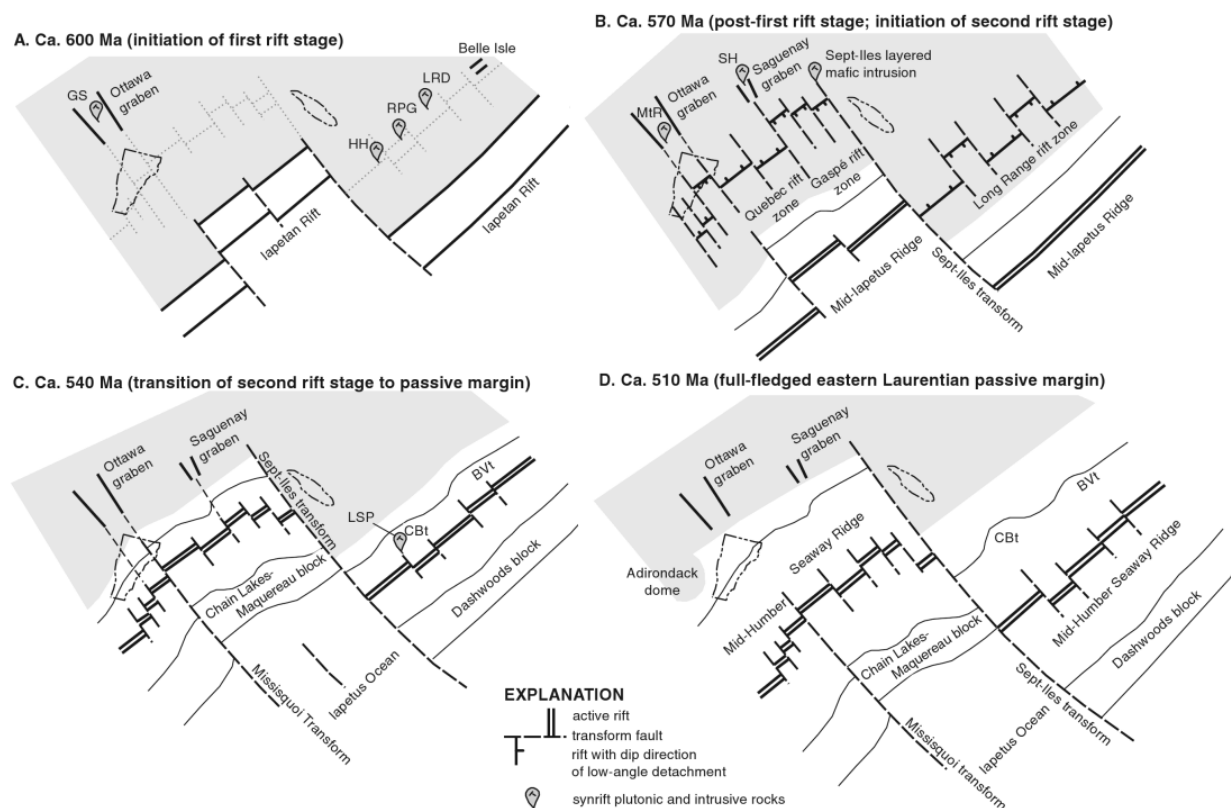


Figure 2.3 : Cartes schématiques séquentielles illustrant l'histoire de la marge Laurentienne néoprotérozoïque- paléozoïque précoce. Tirée de Allen et al. (2010).

Au début de l'Ordovicien, les contraintes s'inversent et la croûte océanique de la marge du continent Laurentia entre en subduction sous la croûte océanique de l'océan Iapetus (Fig. 2.4). Cette zone de subduction crée un arc insulaire que l'on retrouve dans les Appalaches du sud du Québec sous le nom d'Ascot-Weedon (numéro 76 sur la Fig. 2.9).

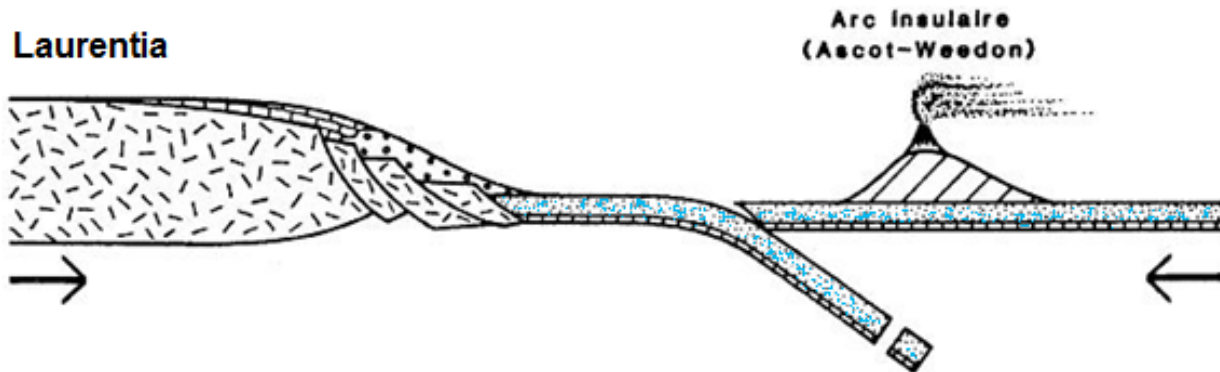


Figure 2.4 : Ordovicien inférieur : début de fermeture de l'océan Iapetus. Création du complexe d'îles en arc d'Ascot-Weedon. Tirée de Gauthier et al. (1994).

Vers la fin de l'Ordovicien, l'arc insulaire nouvellement formé entre en collision avec la marge continentale de Laurentia : c'est l'orogénèse taconienne (Fig. 2.5). Cette orogénèse causera également la formation du complexe ophiolitique de Thetford Mines (numéro 66 sur la Fig. 2.9).

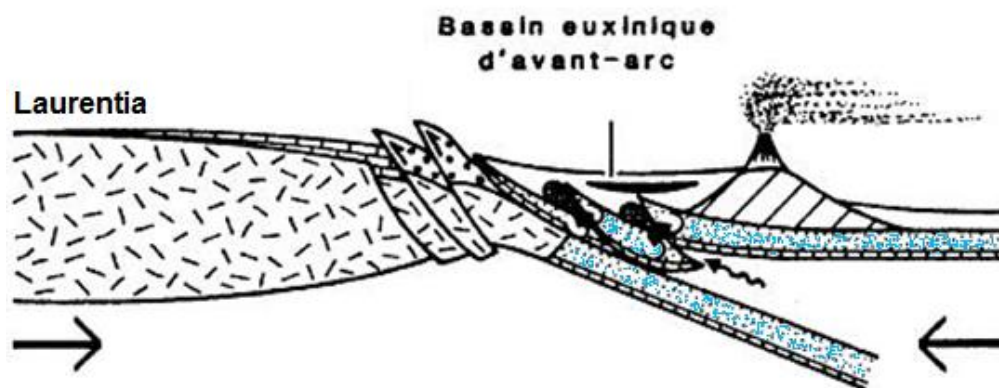


Figure 2.5 : Ordovicien moyen : collision de l'arc insulaire avec le continent Laurentia. Tirée de Gauthier et al. (1994).

Au milieu du Silurien, l'océan Iapetus forme donc une bande étroite entre les continents Laurentia et Avalonia.

De nombreux auteurs s'accordent à penser qu'il y a eu une période d'extension après l'orogénèse taconienne (Bourque, 2001; Castonguay et Tremblay, 2003; Keppie et Dostal, 1994; Moench et Aleinikoff, 2003; Tremblay et Pinet, 2005). Cette période d'extension serait à l'origine de la formation du Synclinorium de Connecticut Valley – Gaspé (SCVG) et du Synclinorium Central Maine (SCM). En réponse à ces processus distensifs, des basaltes de fond océanique se seraient mis en place dans la Formation de Frontenac. D'après le modèle proposé par Tremblay et Pinet (2005), la transition entre la compression et l'extension aurait eu

lieu vers 440 Ma. Cette période d'extension est appelée par les auteurs québécois « extension Salinique » (Bourque, 2001; Castonguay et Tremblay, 2003, Tremblay et Pinet, 2005).

Selon Rankin et al. (2007), cette extension pourrait être causée par les marges irrégulières du continent Laurentia suite à l'orogénèse taconienne. Ceci aurait causé un retrait vers le nord-ouest de la plaque plongeante, provoquant une remontée de l'asthénosphère suivant la fracturation de la plaque plongeante (Fig. 2.6).

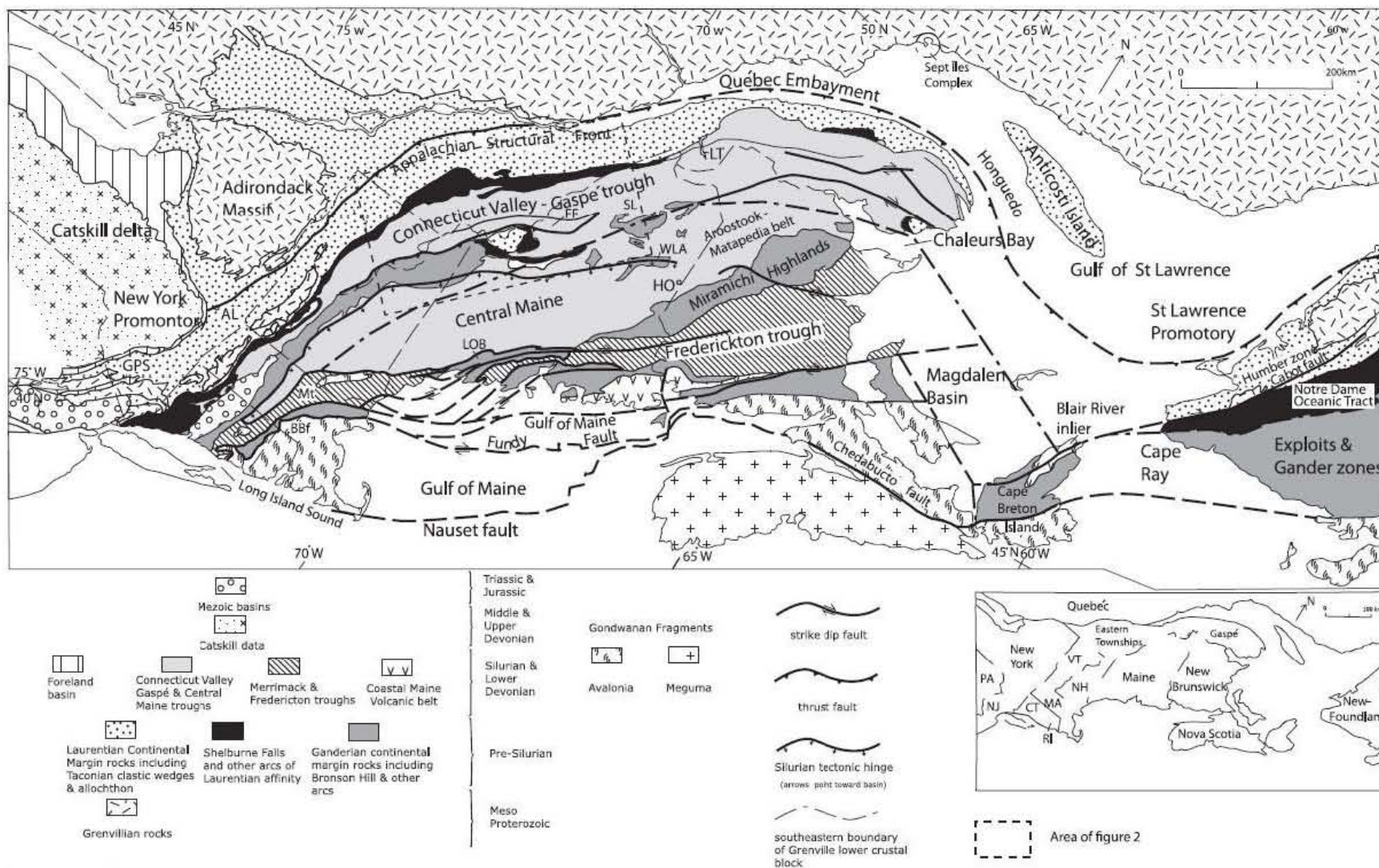


Figure 2.6 : Carte géologique régionale du nord des Appalaches. Tirée de Rankin et al. (2007).

Enfin, après ce bref épisode d'extension, le régime compressif se met à nouveau en place entre la fin du Silurien et le milieu du Dévonien, formant le début de l'orogène acadienne (Fig. 2.7). Cette orogène va entraîner la réaccrétion des microcontinents (i.e. Chain Lakes) à la marge est du Laurentia (Allen et al., 2010; Hibbard et al., 2007).

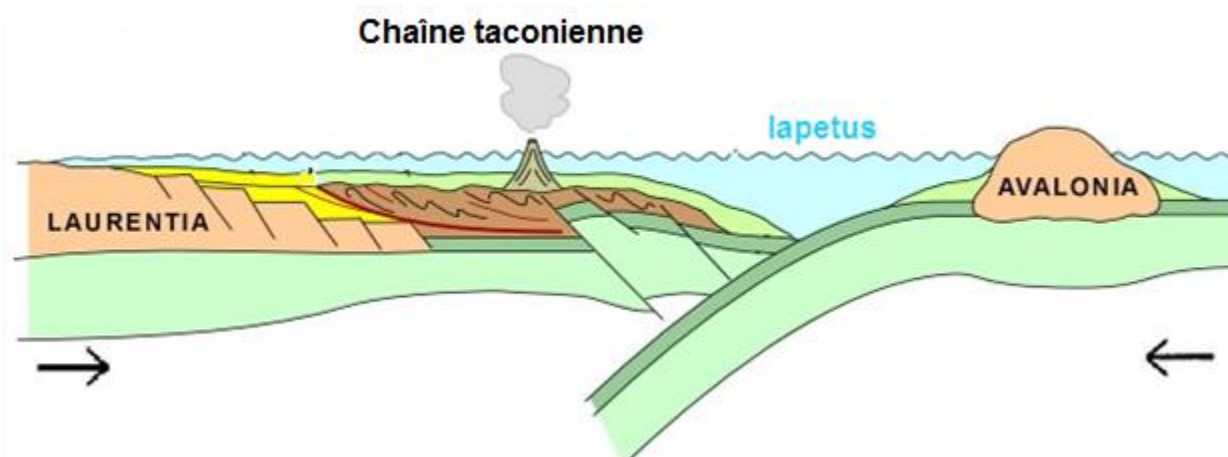


Figure 2.7 : Silurien moyen : L'océan Iapetus sépare le continent Laurentia avec la chaîne taconienne nouvellement formée du microcontinent Avalonia. Entre le Silurien supérieur et le Dévonien moyen aura lieu l'orogénèse acadienne. Tirée de Bourque (2010) (http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html).

C'est dans le bassin d'avant-pays de cette orogène que se sont déposés au début de l'Emsian, les sédiments constituant le synclinorium de Connecticut-Valley Gaspé.

D'après Bradley et al. (1998), le front de la déformation acadienne serait passé sur la région de St-Robert entre l'Eifélien précoce et le Givetien précoce (Fig. 2.8 et 2.13). Les auteurs suggèrent que la vitesse de convergence des deux plaques était de l'ordre de 0,6 à 1,2 cm/an.

Pendant l'orogénèse acadienne, les régions du sud du Québec et du nord du Maine et du Vermont contenaient une série complexe de zone de subduction et d'arcs volcaniques (Gerbi et al., 2006). De nombreuses reliques de ces arcs volcaniques peuvent encore être observées (Formation de Jim Pond, complexe de Boil Mountain, pluton de Skinner et pluton d'Attean).

Plusieurs auteurs estiment que le massif de Chain Lakes situé au sud de St-Robert aurait alors joué un rôle de « collisionneur » (Moench et Aleinikoff, 2003; Gerbi et al., 2006).

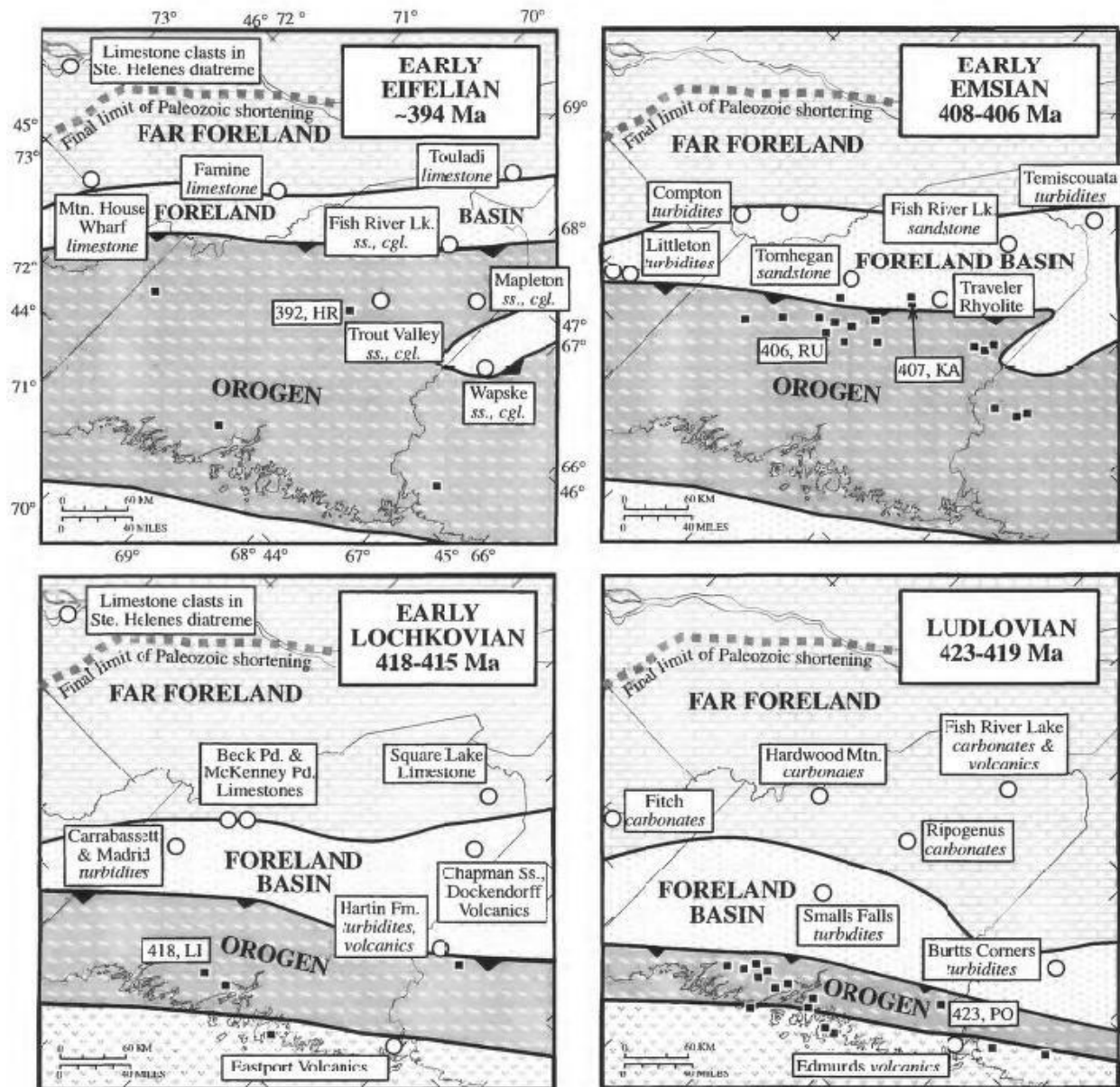


Figure 2.8 : Représentation schématique de l'avancée de l'orogénèse acadienne entre l'Eifélien précoce et le Ludlovien. Tirée de Bradley et al. (1998).

2.2 Géologie régionale

La propriété St-Robert se trouve dans la Formation dévonienne de Frontenac (Fig. 2.9). Cette dernière est constituée d'unités de roches volcaniques et sédimentaires formées pendant l'orogénèse acadienne. Seule l'unité de roches sédimentaires est visible sur la propriété. Cette formation est pincée entre deux failles majeures (Fig. 2.10) :

- au nord, par la faille de la rivière Victoria délimitant la limite sud du *Synclinorium de Connecticut Valley - Gaspé* (SCVG). Elle séparerait le membre de Compton au nord du membre de Frontenac au sud,
- au sud, par la faille de Woburn qui sépare les unités protérozoïques du massif de Chain Lakes et siluro-dévoniennes de Seeboomook (équivalent du membre de Compton) des unités de roches volcano-sédimentaires de la Formation de Frontenac.

Le pendage, la position et le jeu de ces failles ne sont pas encore bien définis. Lafrance (1995) a cependant déterminé que la faille de la rivière Victoria était de type inverse avec un pendage vers le sud-est ce qui est donc l'inverse de ce qui est suggéré sur la coupe schématique présentée par Gauthier et al. (1994) (Fig. 2.10).

D'après Lafrance (1995), cette faille se situerait le long du contact nord-ouest des volcanites de la Formation de Frontenac correspondant donc à la faille Bella définie par Lebel et Tremblay (1992). Si cette position est vérifiée, la faille de la rivière Victoria traverserait la propriété St-Robert dans sa partie sud.

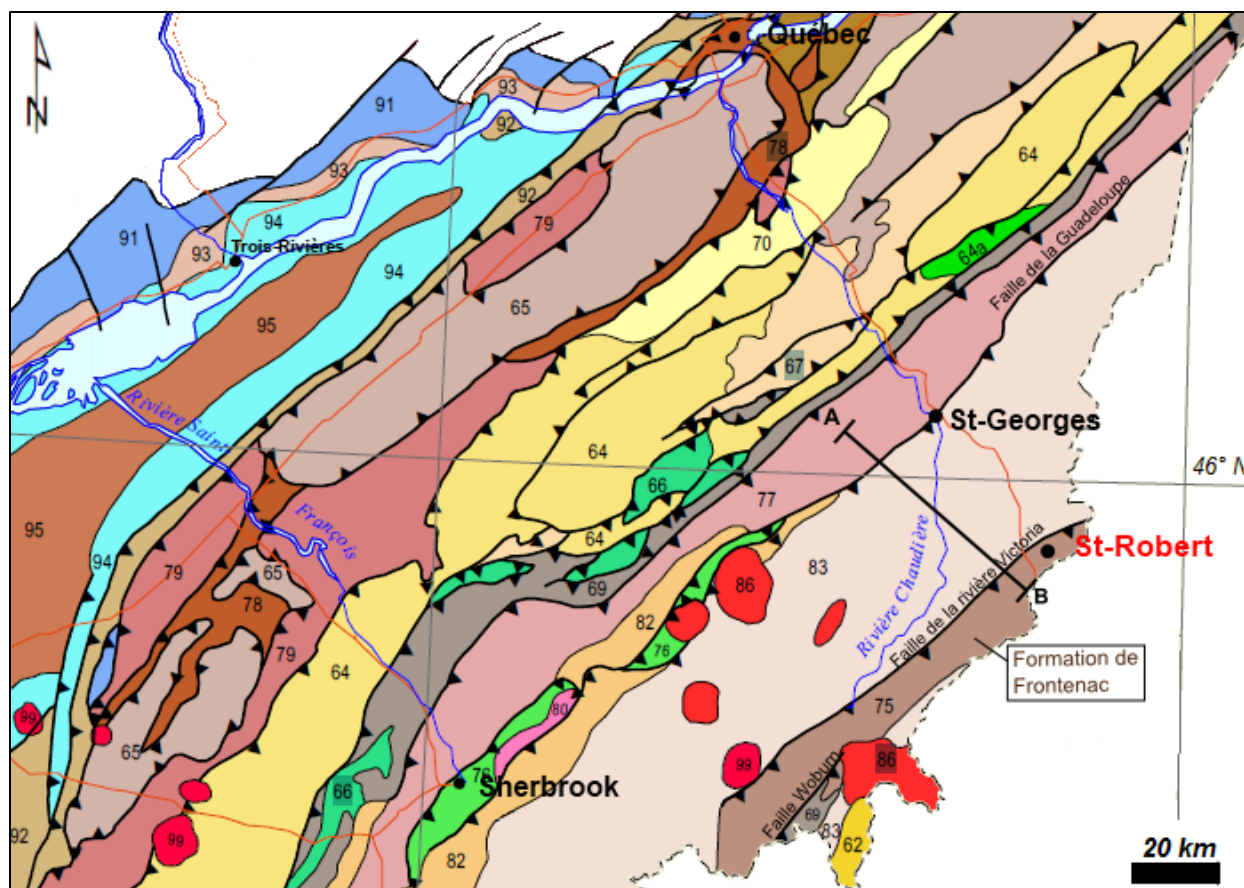


Figure 2.9 : Carte géologique des Appalaches de la région de St-Robert et légende. Modifiée de la carte géologique du Québec du MRNF, 2002. Les numéros 88 à 92 représentent les membres de la plate-forme du St-Laurent. La droite A-B représente le tracé de la coupe géologique présentée sur la figure 2.10.

PROVINCE DES APPALACHES

PALÉOZOÏQUE

PERMO-CARBONIFÈRE

- 87 Conglomérat, grès et mudrock rouge (formations de Bonaventure et de Cannes-de-Roches); grès, mudrock, sel, gypse, calcaire et roches volcaniques mafiques (Groupe de Windsor); grès rouge (Groupe de Pictou)

DÉVONIEN

- 86 Roches intrusives felsiques et mafiques (Suite intrusive de Lemieux)

SILURIEN ET DÉVONIEN

- 85 Grès feldspathique, conglomérat, mudrock vert et rouge et calcaire (Grès de Gaspé)
- 85a Basalte et rhyolite
- 84 Calcaire, mudstone calcaireux, grès, ardoise, basalte et rhyolite (Calcaires supérieurs de Gaspé)
- 83 Shale, grès, calcaire et ardoise (groupes de Saint-Francis et de Fortin; Formation de Témiscouata)
- 82 Mudrock, grès, calcaire et conglomérat (groupes de Chaleurs, de Saint-Francis et de Glenbrooke; formations de Lac Aylmer, de Cranbourne et de Saint-Luc)
- 82a Basalte

ORDOVICIEN ET SILURIEN INFÉRIEUR

- 81 Calcaire, mudrock, grès et conglomérat (groupes de Matapédia et d'Honorat; Formation de Cabano)
- 80 Granite (Granite des monts Stoke)
- 79 Ardoise, calcaire, siltstone, mudstone, grès, conglomérat et roches pyroclastiques (Groupe de Stanbridge; formations de Bourret, de Bulstrode et de Melbourne)
- 78 Schiste à blocs (olistostromes de Drummondville et de Rivière Etchemin; Formation de Citadelle)
- 77 Ardoise, grès, mudrock et roches volcanoclastiques (Groupe de Magog)
- 76 Roches volcaniques mafiques et shale (Groupe d'Ascot)
- 75 Shale, grès et basalte (formations de Frontenac et de Clinton)

CAMBRIEN ET ORDOVICIEN

- 74 Mélange constitué de lithologies des formations de Rivière Ouelle, de Tourelle et de Deslandes dans une matrice de mudrock rubané vert et noir (Mélange de Cap-Chat)
- 73 Grès lithique, calcaire, mudrock, shale et chert (formations de Deslandes et de Cloridorme)
- 72 Grès lithique, mudrock, conglomérat et mélange (Groupe de Mictaw)
- 71 Mudstone, conglomérat, shale, grès glauconieux, calcaire et siltstone (Groupe de l'Île d'Orléans; formations de Lauzon et de Lévis)
- 70 Grès, mudrock, conglomérat et calcaire (groupes de Trois-Pistoles et de Philipsburg; formations de Romieu, de Rivière Ouelle, de Corner-of-the-beach, de Murphy Creek, de Tourelle et de Sainte-Hénédine)
- 69 Blocs et copeaux de grès, de roches volcaniques, de granite, de gabbro et de serpentinite (mélanges de Saint-Daniel et de Chesham)
- 68 Péridotite (Complexe du mont Albert); amphibolite (Amphibolite du Diable)
- 67 Grès quartzitique, mudrock, quartzite et ardoise (Groupe de Rosaire)
- 66 Amphibolite, roches volcaniques mafiques, péridotite, pyroxénite, gabbro et serpentinite (complexes ophiolitiques de Thetford Mines et d'Asbestos)
- 65 Mudrock, ardoise vert et rouge, grès, calcaire et basalte (groupes de Saint-Roch, de Sillery, de Shefford et de Trinité; formations d'Ile-aux-Coudres et de Saint-Bernard-sur-mer)

PRÉCAMBRIEN OU CAMBRIEN

- 64 Grès, conglomérat, ardoise, dolomie et phyllade (groupes d'Oak Hill et de Caldwell); schiste, phyllade rouge, grès vert et shale vert (Schistes de Bennett)
- 64a Basalte (Groupe de Caldwell)
- 63 Métabasalte et roches métasédimentaires (grès, siltstone, conglomérat et mudrock rouge et vert) (groupes de Shickshock et de Maquereau)

PROTÉROZOÏQUE

- 62 Paragneiss (Massif de Chain Lakes)

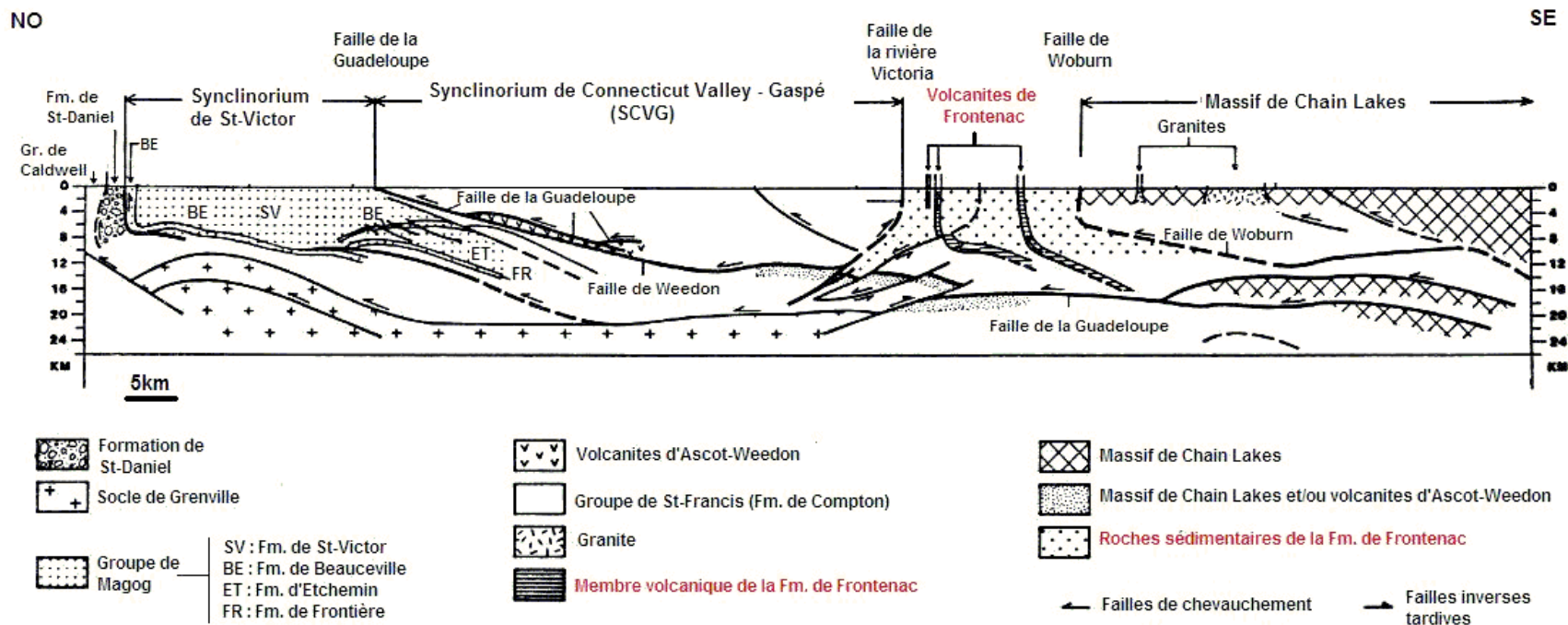


Figure 2.10 : Coupe schématique de la région de l'Estrie-Beauce au sud-est des Appalaches du Québec. Voir la figure 2.9 pour l'emplacement de la coupe. La propriété St-Robert se retrouve entre les failles de la rivière Victoria et Woburn. Tirée de Gauthier et al. (1994).

2.2.1 Formation de Frontenac

Les roches sédimentaires de la propriété de St-Robert appartiennent à la Formation de Frontenac qui forme une bande NE-SO d'environ 15 kilomètres de large qui, au Québec, s'allonge sur environ 110 kilomètres de la frontière du New Hampshire au sud-ouest à celle du Maine au nord-est. Elle est limitée par la faille de Woburn au sud-est et la faille de la Rivière Victoria au nord-ouest (Fig. 2.10 et 2.11). La Formation de Frontenac est constituée de plusieurs séries volcano-sédimentaires qui seraient composées de volcanites basiques à intermédiaires et de roches sédimentaires silto-gréseuses.

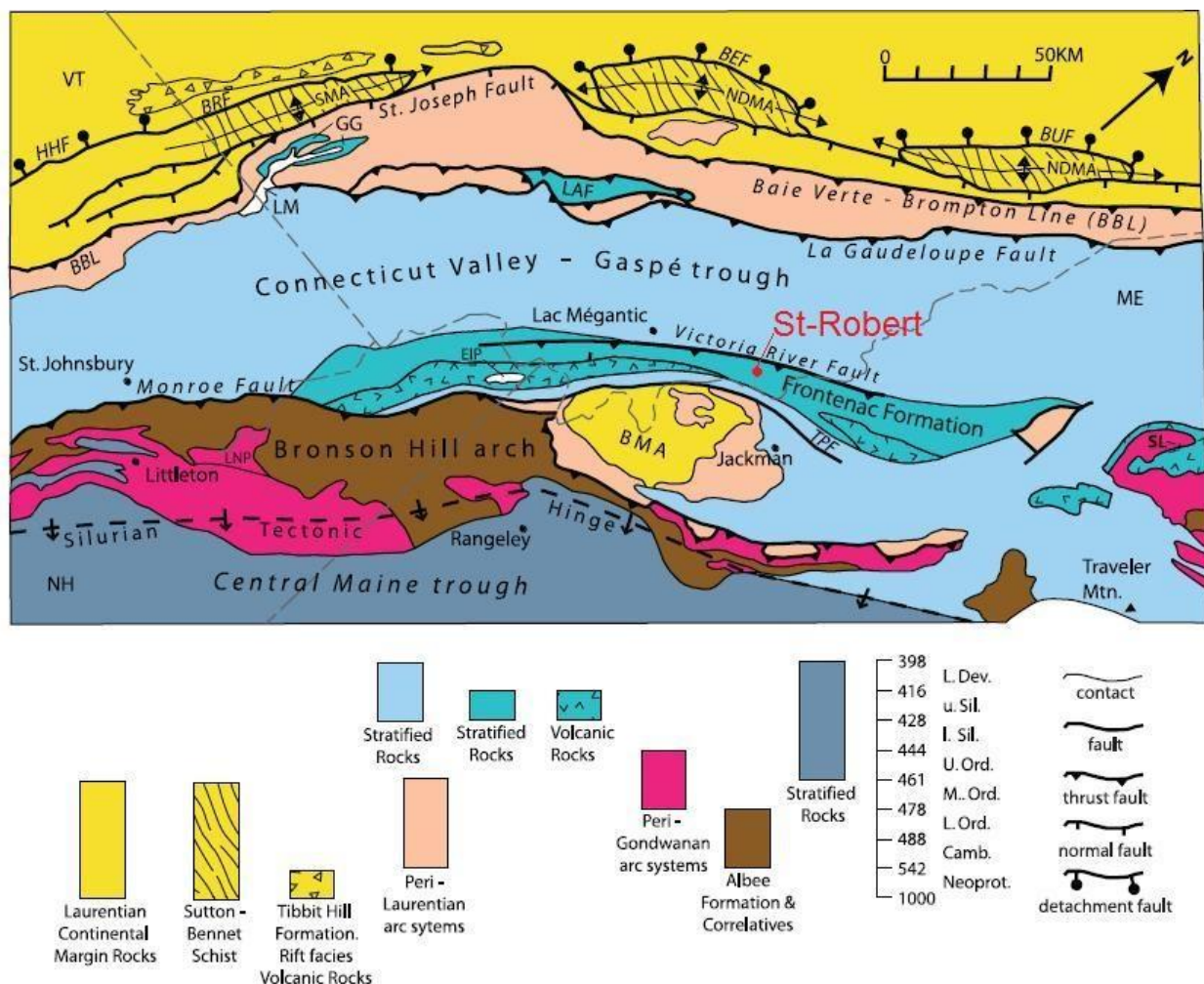


Figure 2.11 : Carte litho tectonique d'une partie du Vermont, du New Hampshire, du Maine et du Québec. BEF : Faille Bennett, BMA : Boundary Mountains arch, BRF : Faille de Brome, BUF : Faille de Buckland, EIP : Pluton East Inlet, GG: Groupe de Glenbrooke, HHF : Faille de Honey Hollow, LAF : Formation du Lac Aylmer, LM : Lac Memphrémagog, LNP : Pluton Lost Nation, NDMA : Anticlinale de Notre Dame Mountains, SL : Lac aux araignées, TPF : Thrasher Peaks fault. Tirée de Rankin et al. (2007).

Le peu d'affleurements, le manque de fossile et les structures complexes affectant cette formation sont les principales raisons pour lesquelles elle est si peu documentée dans la littérature scientifique et que le peu de documents la concernant est en contradiction (Fig. 2.12). Par exemple, son âge a été de nombreuses fois réévalué. Alors que Marvinney (1986) considérait l'âge de cette formation principalement dévonien, Chevé (1990) et Marleau (1958) suggéraient qu'elle serait d'âge siluro-dévonien, tandis que Lafrance (1995) et Jahrling (1983) suggéraient des âges dévoniens précoce et ordovicien tardif respectivement. D'autres auteurs associent cette séquence volcano-sédimentaire au Groupe de Magog situé au nord-ouest des copeaux d'arc insulaire décrivant ainsi une structure synclinale. (Numéros 77 sur la figure 2.9; Bernard, 1987, Gauthier et al., 1994).

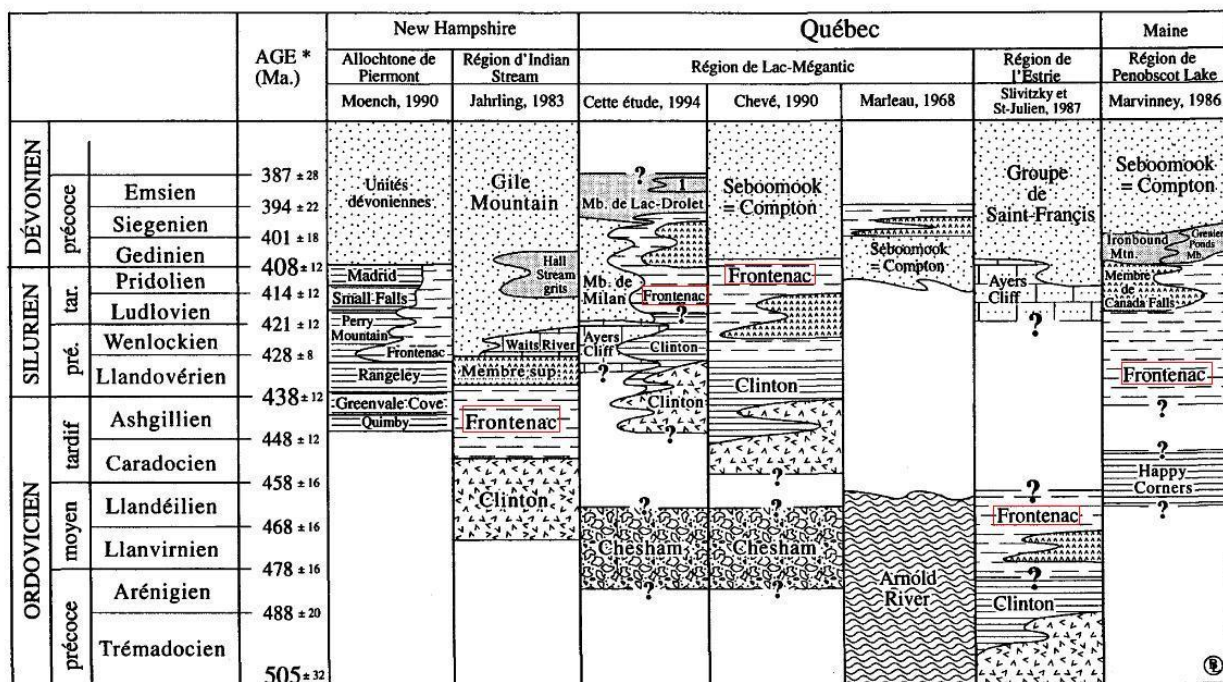


Figure 2.12 : Différentes échelles stratigraphiques proposées pour les unités lithologiques ordoviciennes à dévoniennes de la région de Lafrance (1995).

Boone (1981) observa dans la Formation de Seeboomook (équivalent de Compton) de nombreux plis en chevrons de petite échelle et des surfaces de cisaillements de plus en plus abondantes à proximité du contact avec la Formation de Frontenac. Il supposa donc que le contact entre ces deux formations est une faille. La Formation de Seeboomook présente des plantes fossiles datant de l'Emsien (394 - 409 Ma) (Hueber et al., 1990). Toutefois, Boucot (1961), Marleau (1968), Albee et Boudette (1972), Marvinney (1986), Lebel et Tremblay (1992)

et Lafrance (1994) ont déterminé que le contact entre la Formation de Frontenac et la Formation de Seeboomook (Compton) serait de nature sédimentaire.

Cette longue polémique s'est terminée suite aux études de Lyons et al (1997) et de Moench et al (1995) qui ont effectué plusieurs datations U-Pb sur les zircons de tufs felsiques, de dykes felsiques et de rhyolites associés au faciès volcanique de la Formation de Frontenac située dans le Maine et le New Hampshire. Ces études donnèrent des âges essentiellement siluriens (418 - 432 Ma).

Enfin, des études de micro-fossiles présents dans les mudstones de la Formation de Frontenac effectuées par Asselin (2002) et Van Grootel et al. (1995) ont indiqué des âges Lochkovien tardif à Pragian précoce pour le membre sédimentaire de la Formation de Frontenac (Fig. 2.13). De ce fait, le contact entre les formations de Seeboomook et de Frontenac serait de nature sédimentaire et ces deux ensembles formeraient donc bien un synclinal.

La Formation de Frontenac a subi une déformation significative associée aux nombreuses failles présentes dans le SCVG et représentée par une schistosité importante parallèle au grain tectonique des Appalaches du sud du Québec. À cause de cette déformation intense, aucune estimation rigoureuse de l'épaisseur de cette formation n'a été effectuée.

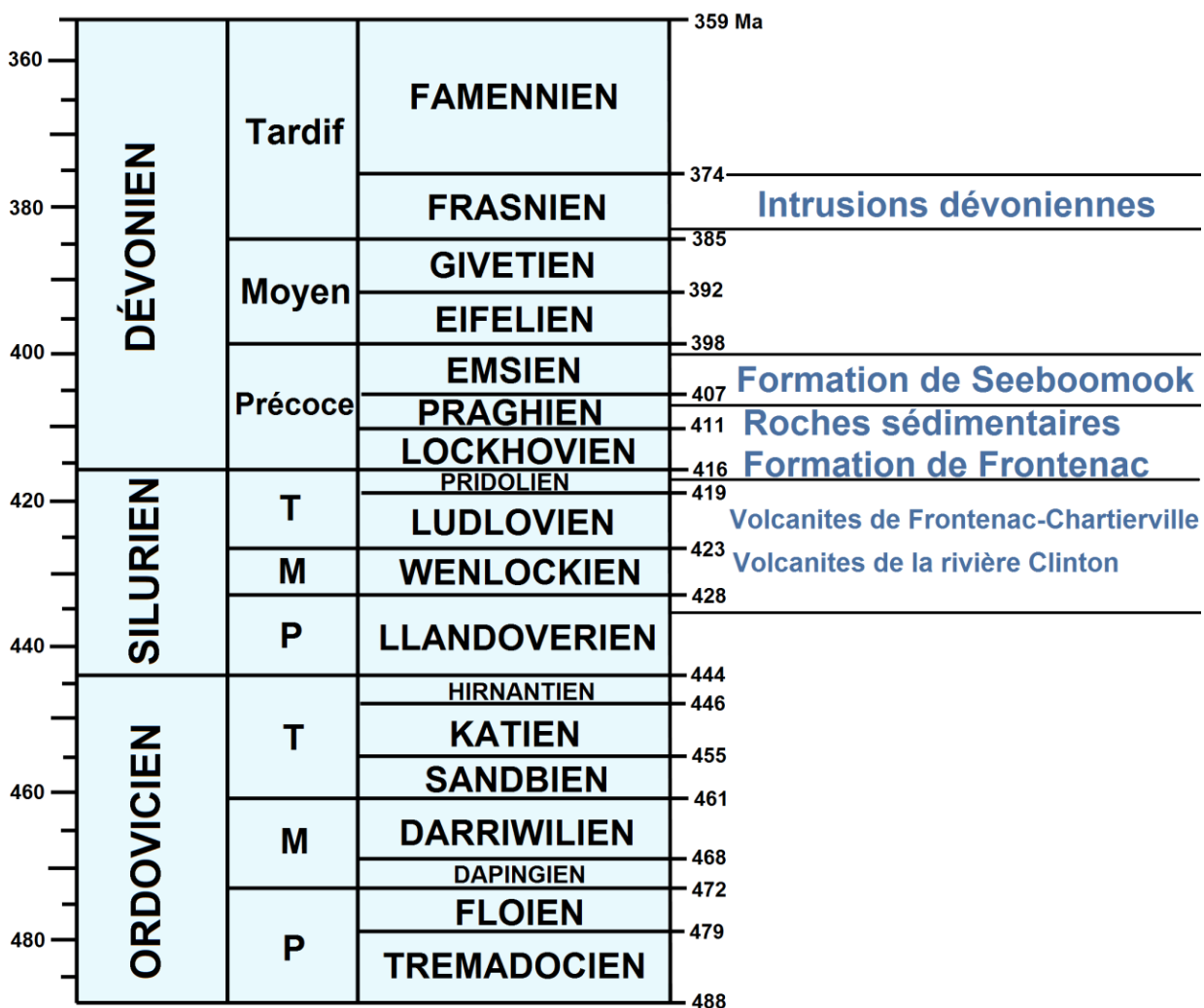


Figure 2.13 : Échelle des temps géologiques centrée sur la période orogénique appalachienne. Données tirées de Heitzler et al. (1988), Hueber et al. (1990), Lyons et al. (1997), Moench et al. (1995) et Simonetti et Doig (1990).

2.2.1.1 Volcanites

La Formation de Frontenac contient deux unités volcaniques principales (Chevé, 1990) :

- les métavolcanites de la rivière Clinton, au sud-est, composées d'une bande de basaltes coussinés surmontée d'un niveau mince de chert jaspilitique, de grès à magnétite avec localement des tufs à cristaux de plagioclase (Chevé, 1990; Lebel et al., 1992);
- les métavolcanites de Frontenac-Chartierville, au nord-ouest, aussi appelées « membre de Lac-Mégantic » constituées de basaltes coussinés avec localement quelques niveaux de gabbros.

Entre ces deux unités se situe le membre du mont Dostie, composé de basaltes en coussins associés à un niveau pyroclastique et gabbroïque (Chevé, 1990; Lebel et al., 1992).

D'après Chevé (1990), les membres du mont Dostie et de Frontenac-Chartierville seraient plus jeunes que celui de la rivière Clinton.

Notez que ces épanchements de roches volcaniques se seraient produits à une profondeur d'environ 2500 mètres (Chevé, 1990).

Dans son étude, Chevé (1990) a utilisé une dizaine de diagrammes discriminants afin de préciser le contexte géodynamique probable de mise en place de cette unité ($\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$; $\text{Ni-FeO}^*/\text{MgO}$; $\text{V-FeO}^*/\text{MgO}$; $\text{Cr-FeO}^*/\text{MgO}$; V-Cr ; $\text{TiO}_2\text{-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$; Ti-Sr-Zr ; Ti-Cr et Ti-Zr-Y). Il a ainsi caractérisé les roches volcaniques de la Formation de Frontenac comme étant principalement des basaltes subalcalins, d'affinité tholéitique issus de fonds océaniques en domaine intraplaque.

Cependant, Chevé (1990) a également montré une séparation des deux sous-unités volcaniques de la Formation de Frontenac avec pour les métavolcanites de Frontenac-Chartierville un regroupement situé dans le champ des basaltes intraplaques (WPB) et pour les métavolcanites de la Rivière Clinton, un regroupement dans le champ des basaltes de fonds océaniques. Toutefois, la signature géochimique observée ne serait pas totalement incompatible avec une zone de transition entre la marge continentale et le domaine océanique. Dans ce type d'environnement complexe, il se peut que la lithosphère mantellique ait été antérieurement affectée par de l'activité magmatique de type OIB (basaltes d'îles océaniques) créant donc une signature de basaltes intraplaques lors de l'extension de la bordure de la marge continentale. Ce phénomène n'est pas unique et a également été observé dans les volcanites carbonifères des îles de La Madeleine au Québec (LaFlèche et al., 1998).

Cette observation pourrait donc démontrer une différence de source entre les deux épisodes d'épanchements volcaniques. Une source mantellique plus métasomatisée serait associée à la formation des basaltes de Frontenac-Chartierville. Le passage d'une source variablement métasomatisée à une source plus « asthénosphérique » est prévisible dans un scénario d'extension progressive de la lithosphère de la marge continentale, sans toutefois indiquer une différence de contexte tectonique.

Blain (1989) a également analysé les terres rares sur six échantillons de l'unité de Frontenac-Chartierville et l'allure générale des spectres de terres rares serait transitionnelle entre des basaltes enrichis de la série des E-MORB et des OIB. Pour quatre échantillons sur six, un enrichissement (jusqu'à 100 fois chondrite) en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes est observé suggérant la fusion d'une source enrichie en terres rares légères. La faible anomalie en Eu observée pourrait être causée par la cristallisation fractionnée de plagioclase caractérisant un milieu de faible fO_2 et réduit qui est compatible avec un environnement de fonds océaniques (Fig. 2.14).

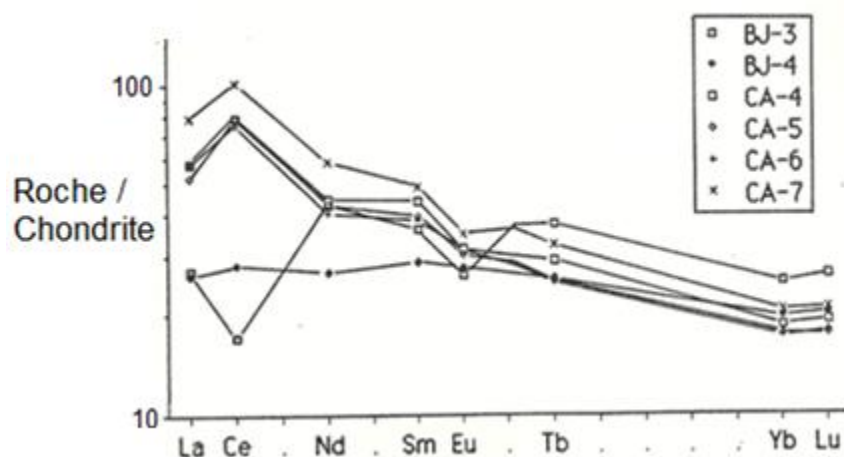


Figure 2.14 : Spectres des terres rares normalisés aux valeurs chondritiques des volcanites de Frontenac-Chartierville. Tirée de Blain (1989).

2.2.1.2 Roches sédimentaires

Lafrance (1995) a utilisé la méthode de Grazzi-Dickinson pour déterminer la provenance des séquences de roches sédimentaires de la Formation de Frontenac, et pour les membres de Milan et de Lac-Drolet de la Formation de Compton (Fig. 2.15). L'auteur conclut son étude en suggérant que l'unité de roches sédimentaires de la Formation de Frontenac dériverait d'une source cratonique située au sud-est et vraisemblablement constituée du Massif Précambrien de Chain Lakes (numéro 62 sur la Fig. 2.9) et des unités ordoviciennes qui lui sont accrétées.

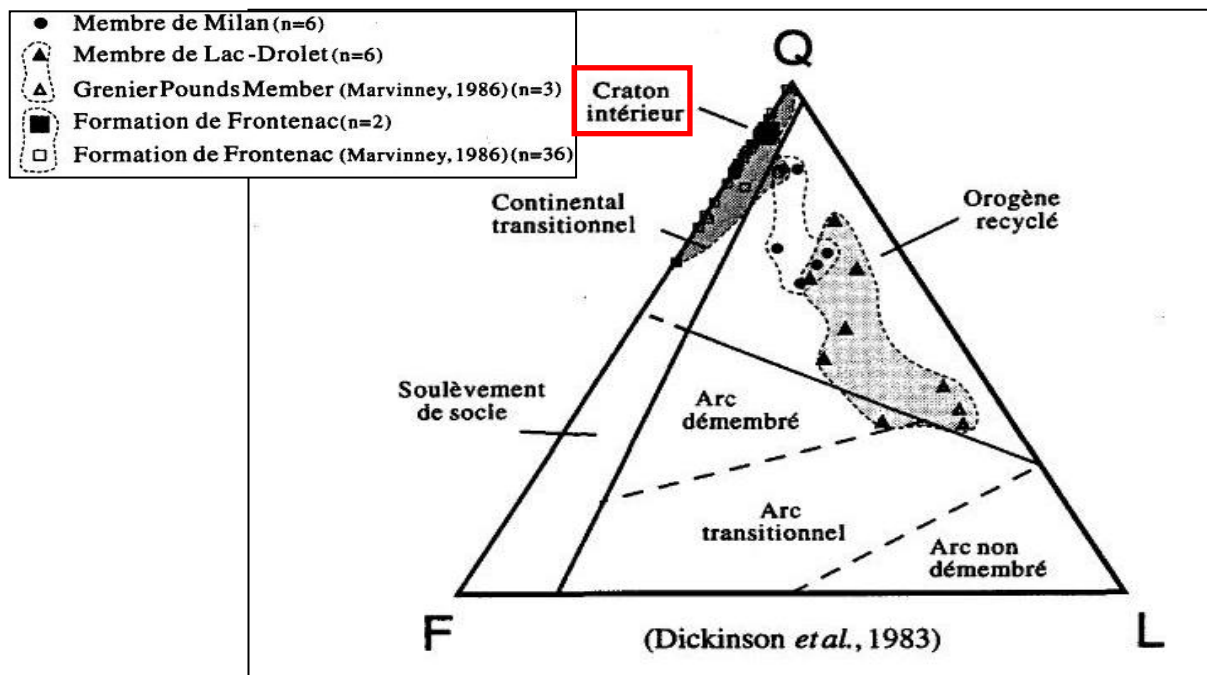


Figure 2.15 : Diagramme de provenance des roches sédimentaires. Q= quartz mono et polycristallin, F= plagioclase et feldspath potassique et L= fragments lithiques sédimentaires, volcaniques et métamorphiques. Étude réalisée en comptant 300 points pour chaque échantillon. Modifié de Lafrance (1995).

Cette observation est en accord avec notre modèle selon lequel les volcanites de la Formation de Frontenac se seraient déposées dans un environnement complexe de transition entre la marge continentale et le domaine océanique lors d'une période d'extension.

Plusieurs hypothèses sont invoquées pour expliquer le changement d'un régime tectonique compressif à extensif pendant l'orogénèse acadienne :

1. Une collision oblique d'un complexe d'île en arc et du massif gneissique de Chain Lakes avec le continent nord-américain créant un bassin de transtension dans lequel les volcanites de la Formation de Frontenac auraient pu s'épancher (Gauthier et al, 1994; Chevé, 1990; Lafrance, 1995).
2. La délamination lithosphérique de la zone de subduction sous-jacente aurait permis une remontée du manteau asthénosphérique créant la fusion partielle de la croûte inférieure à l'origine des intrusions granitiques (Bourque, 2001; Castonguay et Tremblay, 2003; Tremblay et Pinet, 2005). La présence d'un manteau lithosphérique métasomatisé lors de la remontée de l'asthénosphère pourrait être la source du magmatisme mafique intraplaque (volcanites de Frontenac-Chartierville).
3. La présence de marges irrégulières du continent Laurentia, suite à l'orogénèse taconienne, causant un retrait vers le nord-ouest de la plaque plongeante, provoquant une remontée de l'asthénosphère suivant la fracturation de la plaque plongeante (Rankin et al., 2007).

2.2.2 Roches intrusives

Comme nous le décrirons dans les chapitres suivants, la présence d'une masse intrusive sous-jacente à la propriété est depuis longtemps envisagée. En effet, les données des levés magnétométriques, l'altération potassique et la présence d'indicateurs de métamorphisme de contact sur la propriété St-Robert impliquent la présence d'une masse intrusive. Cette dernière est probablement responsable de l'injection d'une multitude de dykes granodioritiques observés sur la propriété St-Robert.

Du fait de l'absence d'analyses géochimiques sur cet intrusif, nous avons compilé les données lithogéochimiques provenant des nombreux plutons contemporains de cette région (MRC du Granit). En effet, au sein de la région du Lac-Mégantic, six plutons granodioritiques sont observables (Fig. 2.16) : cinq plutons dévoniens (Lac aux Araignées, Scotstown, Winslow, Alymer et Saint-Sébastien - Sainte-Cécile) et un pluton du Crétacé faisant partie des Montérégiennes (Mont-Mégantic). Dans ce chapitre, nous présentons uniquement les données provenant des plutons dévoniens.

Ces plutons recoupent une variété de roches dont l'âge s'échelonne du Précambrien (Formation de Rivière Arnold) au Siluro-Dévonien (Groupe de St-Francis) et ont formé des auréoles de métamorphisme de contact d'une largeur approximative moyenne de 1,5 kilomètre (Bourne, 1989).

Bourne (1989) a effectué une étude lithogéochimique de 275 échantillons provenant de ces cinq plutons dévoniens. Il a pu noter qu'ils ont tous une composition moyenne de type granodiorite et qu'ils sont d'affinité calco-alcaline.

Simonetti et Doig (1990) et Heitzler et al. (1988) ont daté ces cinq plutons dévoniens à l'aide de la méthode U-Pb sur les zircons. Les âges obtenus sont présentés sur la figure 2.16. Nous pouvons remarquer que ces plutons se sont tous formés dans un intervalle de 11 millions d'années, au Frasnien (374-385 Ma), et sont donc un peu plus jeunes que les volcanites de la Formation de Frontenac qui se sont mises en place environ 30 millions d'années plus tôt (418-432 Ma ; Fig. 2.13).

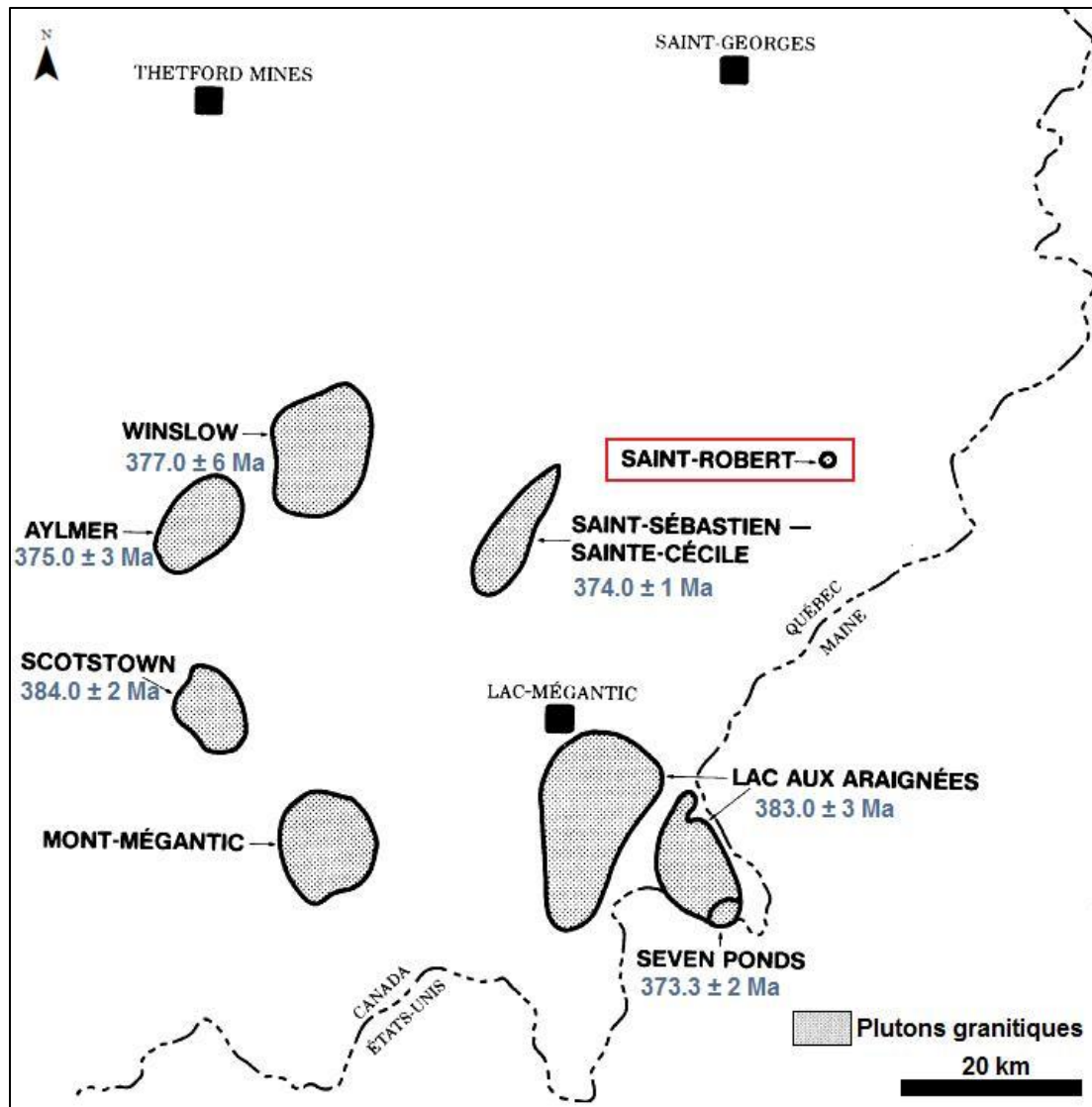


Figure 2.16 : Répartition géographique des différents plutons granitiques dévoniens et crétacés de la région de Saint-Robert Bellarmin. Modifiée de Bourne (1989). L'âge des plutons dévoniens est issu des études de Simonetti et Doig (1990) et de Heitzler et al. (1988).

Bourne (1989) a de plus présenté et discuté la variabilité des spectres de terres rares de ces roches intrusives. Ces spectres sont présentés sur la figure 2.17 et sont compatibles avec le caractère calco-alcalin de ces intrusions granitiques. En effet, on observe des pentes très importantes dans les courbes (La/Lu environ égal à 25) avec un enrichissement important en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes et un fractionnement de ces dernières. L'importance du fractionnement des terres rares lourdes dans ces roches pourrait s'expliquer par le fractionnement de grenat et possiblement d'amphibole dans la région source de ces magmas.

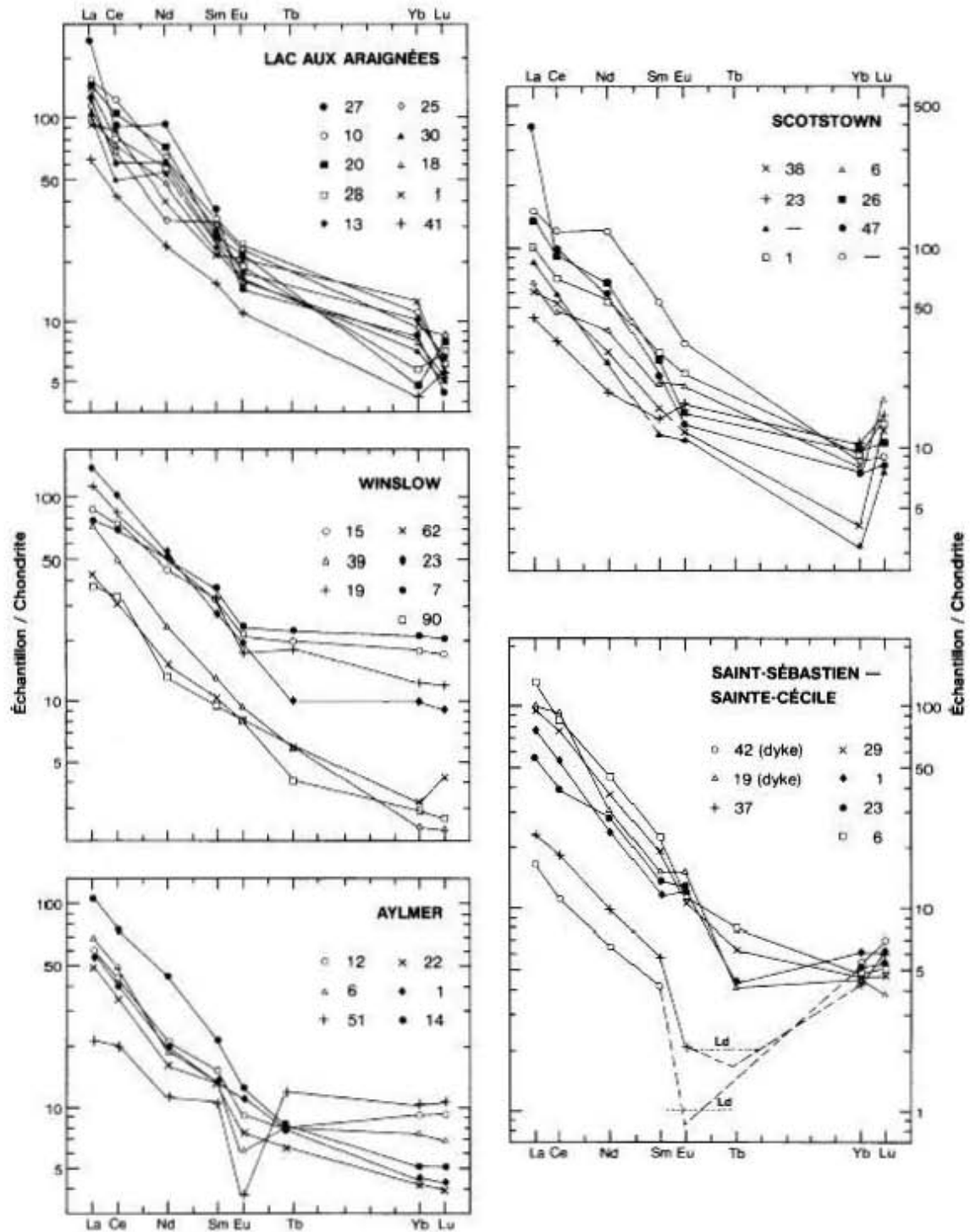


Figure 2.17 : Graphiques en toile d'araignée pour les différents plutons dévoniens de la région du Lac Mégantic. Abondances normalisées aux chondrites. Tirée de Bourne (1989).

D'après Gauthier et al. (1994), les granitoïdes dévoniens auraient cristallisé à une profondeur d'environ huit kilomètres (environ 2,5 k bar) excepté pour l'intrusion de Ste-Cécile- St-Sébastien qui se serait mise en place, d'après Bourne (1989) à des profondeurs moins importantes que les autres intrusions. Ce phénomène pourrait expliquer la présence de minéralisations en molybdène dans ce pluton et l'absence de minéralisations de ce type dans les autres intrusions. De plus, la forme allongée du complexe granitique de Ste-Cécile-St-Sébastien et la forme allongée de l'auréole de métamorphisme de St-Robert ainsi que sa localisation le long d'une faille parallèle aux structures acadiennes suggèrent un fort contrôle tectonique pour la mise en place de ces intrusions. Cette observation suggère que ces plutons seraient de nature syntectonique.

Selon la signature isotopique du plomb de leurs feldspaths (Fig. 2.18), ces plutons seraient probablement de source orogénique. Ce magmatisme résulterait de la fusion partielle de la croûte inférieure grenvillienne appauvrie en Rb ou du massif de Chain Lakes sous-jacent, en réponse à un épaissement crustale durant l'orogène acadienne. (Ayuso et al, 1988; Simonetti et Doig, 1990).

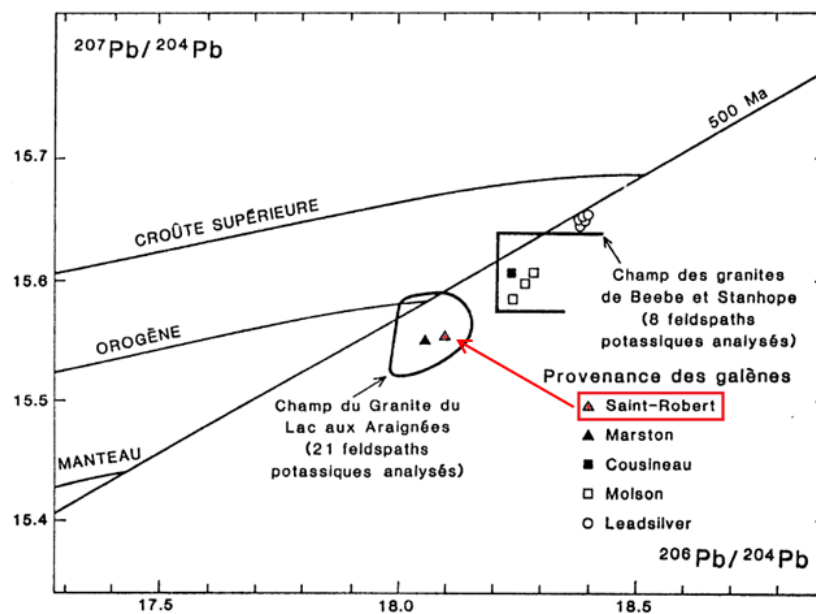


Figure 2.18 : Signature isotopique de feldspaths potassiques provenant d'intrusions granitiques dévoniennes et de galènes extraites des filons liés à ces intrusions. Tirée de Gauthier et al. (1994).

2.3 Métallogénie régionale

La figure 2.20 présente notre compilation des gisements et des principaux indices minéralisés de la région. Ces données sont projetées sur une compilation simplifiée de cartes géologiques québécoises et américaines.

2.3.1 Gîtes et indices aurifères

Les Appalaches du sud du Québec ont longtemps été réputées pour le contenu en or alluvionnaire de certaines rivières. En effet, entre 1847 et 1912, on estime que près de deux tonnes d'or ont été extraites dans les rivières de la Beauce. Deux des plus grosses pépites d'or de l'histoire du Canada ont d'ailleurs été trouvées dans les années 1800 dans la rivière Gilbert située à une trentaine de kilomètres de la propriété St-Robert entre les villes de St-Georges et de Beauceville. La pépite *Mc Donald* contenait 45 onces d'or (1 276 grammes) et la *Kilgour* 52 onces (1 472 grammes). Plus précisément, dans cette région, la Beauce River Company exploita de 1960 à 1962 un placer aurifère et produisit 56 000 onces d'or. Selon de récents forages, effectués par la compagnie Uragold Bay Resources, l'or dans la région de Saint-Simon-les-Mines ne serait pas dans des alluvions récentes, mais dans une unité de diamictes glaciaires anciennes. La présence d'une importante fraction argileuse dans la diamictite créa des problèmes de récupération de l'or et pour cette raison la Beauce River Company cessa ces activités en 1962. Selon Uragold Bay Resources, seulement 20 % de la surface de l'unité de diamictite aurifère aurait été exploitée dans les années 60. Ce secteur pourrait théoriquement contenir plus de 200 000 onces d'or.

Pour la région de la Beauce, la provenance de l'or demeure encore aujourd'hui énigmatique. Dans le secteur de Saint-Simon-les-Mines, *Uragold Bay Resources* a rapporté la présence de trois indices d'or situés dans le voisinage de la faille de la rivière Victoria et dans le secteur des placers aurifères. Ces indices s'alignent sur un linéament orienté SO-NE et parallèlement à la faille de la rivière Victoria. Dans ces indices, l'or est principalement associé à des veines de quartz injectées dans les roches sédimentaires de la Formation de Compton. Les indices Ruisseau du Camp, Armstrong Sud et Portage ont rapporté des valeurs maximales en or, sur des échantillons de surface, de 103 à 163 g/t. Sans toutefois être la source ultime de l'or alluvionnaire, ces données montrent que l'or pourrait être de dérivation locale.

Après la découverte des camps aurifères de l'Abitibi à la fin des années 1920, l'exploration pour l'or dans les Appalaches du Québec se fait plus rare.

Des compagnies comme la *St-Robert Metals* (fin des années 50) et *Les Mines JAG* (1983-1984) ont exploré la région de St-Robert pour l'or et pour d'autres métaux. *St-Robert Metals* aurait intercepté des zones aurifères qui malheureusement n'ont pu être ultérieurement vérifiées par les forages des *Mines JAG*.

D'un autre côté, cette année, un forage de la compagnie torontoise *Golden Hope Ltée* a intercepté au nord-est de St-Robert, 64,1 g/t d'or sur un mètre d'épaisseur. La compagnie *Golden Hope* estime d'ailleurs que 415 000 onces d'or se trouveraient sous sa propriété Bellechasse-Timmins. La compagnie *Golden Hope* a d'ailleurs annoncé des ressources indiquées de 2,9 millions de tonnes (313 900 onces) titrant 3,36 g/t d'Au ainsi que des ressources présumées de 2,17 millions de tonnes (102 000 onces) titrant 1,46 g/t d'Au. L'or se retrouve ici dans des veines de quartz-carbonates associées à des diorites albitisées injectées dans les roches sédimentaires ordoviciennes du Groupe de Magog.

On retrouve également des gisements d'or de type orogénique associés aux grandes failles recoupant la région tels que le gîte de Boil Mountain (Maine), les indices aurifères de la région d'Armstrong (Québec), ceux situés dans un corridor entre la faille Monroe et le Mont Mégantic (secteur au nord de Chartierville).

2.3.2 Métaux de base

Dans la région de la Beauce, les métaux de base Pb, Zn et Cu se retrouvent principalement dans trois environnements géologiques (Chevé, 1990; Gauthier et al., 1994) :

- des amas de sulfures massifs volcanogènes (ex. : Clinton, Lingwick);
- des amas sulfurés dans des sédiments exhalatifs comme, par exemple, les amas sulfurés du gisement de Cupra d'Estrie. Ce dernier contenait 668 140 tonnes de minerai avec des teneurs de 2,74 % de Cu, 1,52 % de Zn, 0,47 % de Pb, 0,51 g/t d'Au et 37,71 g/t d'Ag;
- des filons et stockwerks de quartz (ex : St-Robert) qui, d'après Gauthier et al. (1994) seraient associés à la présence de plutons dévoniens et/ou des grands corridors de déformation acadiens (failles de Woburn, faille de la rivière Victoria, ...). Ceux associés aux failles régionales (ex. : Nebnillis) sont également aurifères. Comme pour St-Robert,

les filons de quartz minéralisés que l'on retrouve dans la région sont orientés selon le grain tectonique des Appalaches du sud du Québec et ont une largeur variant de quelques millimètres à quelques mètres. Bien souvent, le plomb et l'argent dominant mais l'or, le bismuth et le zinc sont également présents.

Amas de sulfures massifs volcanogènes

Les gîtes de sulfures associés aux volcanites de la Formation de Frontenac renferment d'ailleurs de grandes quantités de cuivre et zinc. Par exemple, le Groupe Minier Sullivan a estimé en 1973 que l'ensemble des gîtes de cuivre et zinc de la région de la rivière Clinton totaliserait 1,8 million de tonnes de minerais à 2,02 % Cu et 1,54 % de Zn. La présence de concentrations significatives en Pb, Bi, Au et Ag contribue à la valorisation de ces gîtes minéraux. Le gîte Clinton O a brièvement été exploité de 1974 à 1975 par la compagnie Cambior. Actuellement la compagnie canadienne *Fancamp Exploration* détient les droits d'exploration sur ce secteur et une campagne de forage et de nouveaux travaux géophysiques sont présentement en cours.

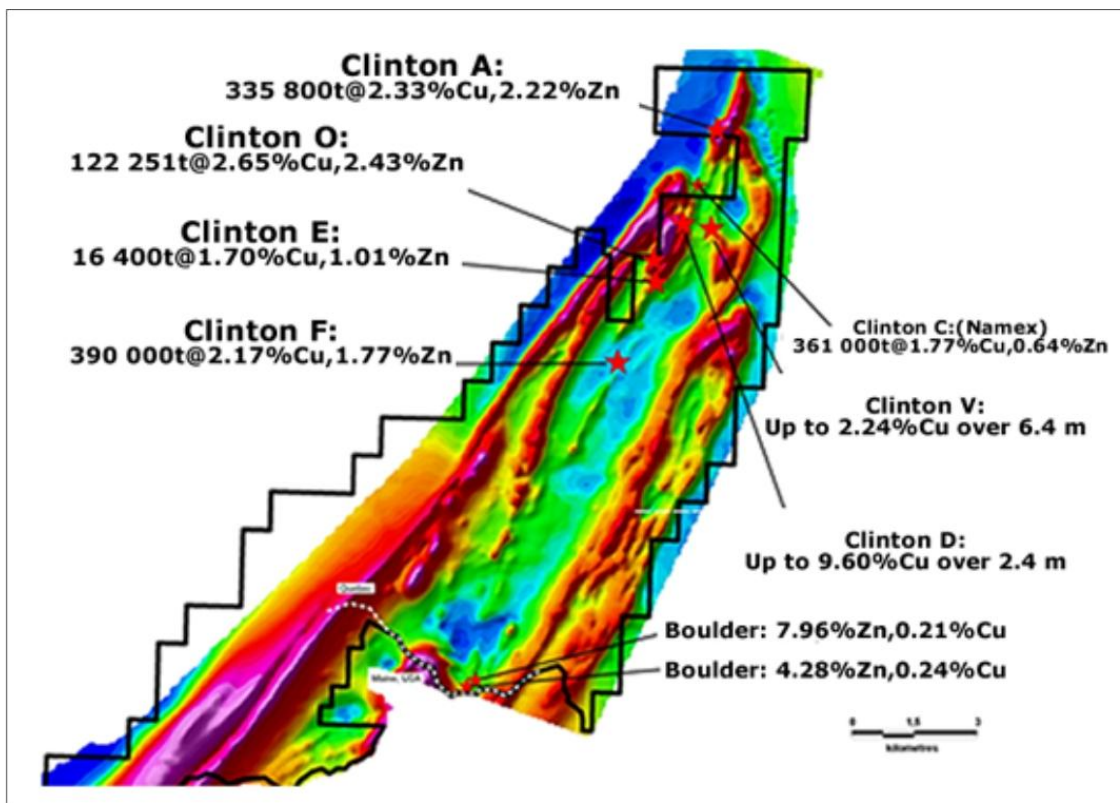


Figure 2.19 : Carte de localisation des principaux gîtes de sulfures massifs de la Formation de Frontenac (Clinton). Figure tirée du site web de Fancamp Exploration Ltée. (www.fancampexplorationltd.ca).

Le gisement de sulfures massifs de Ledge Ridge (Cu-Zn) dans le Maine serait un équivalent américain de la série d'amas sulfurés de la rivière Clinton (Zn-Pb-Cu). Ce gisement contient 3,7 millions de tonnes de minerai avec des teneurs de 2,3 % de Zn, 0,95 % de Cu, 0,85 % de Pb, 0,6 oz/t d'Ag et 0,015 oz/t d'Au (Lepage et al., 1991).

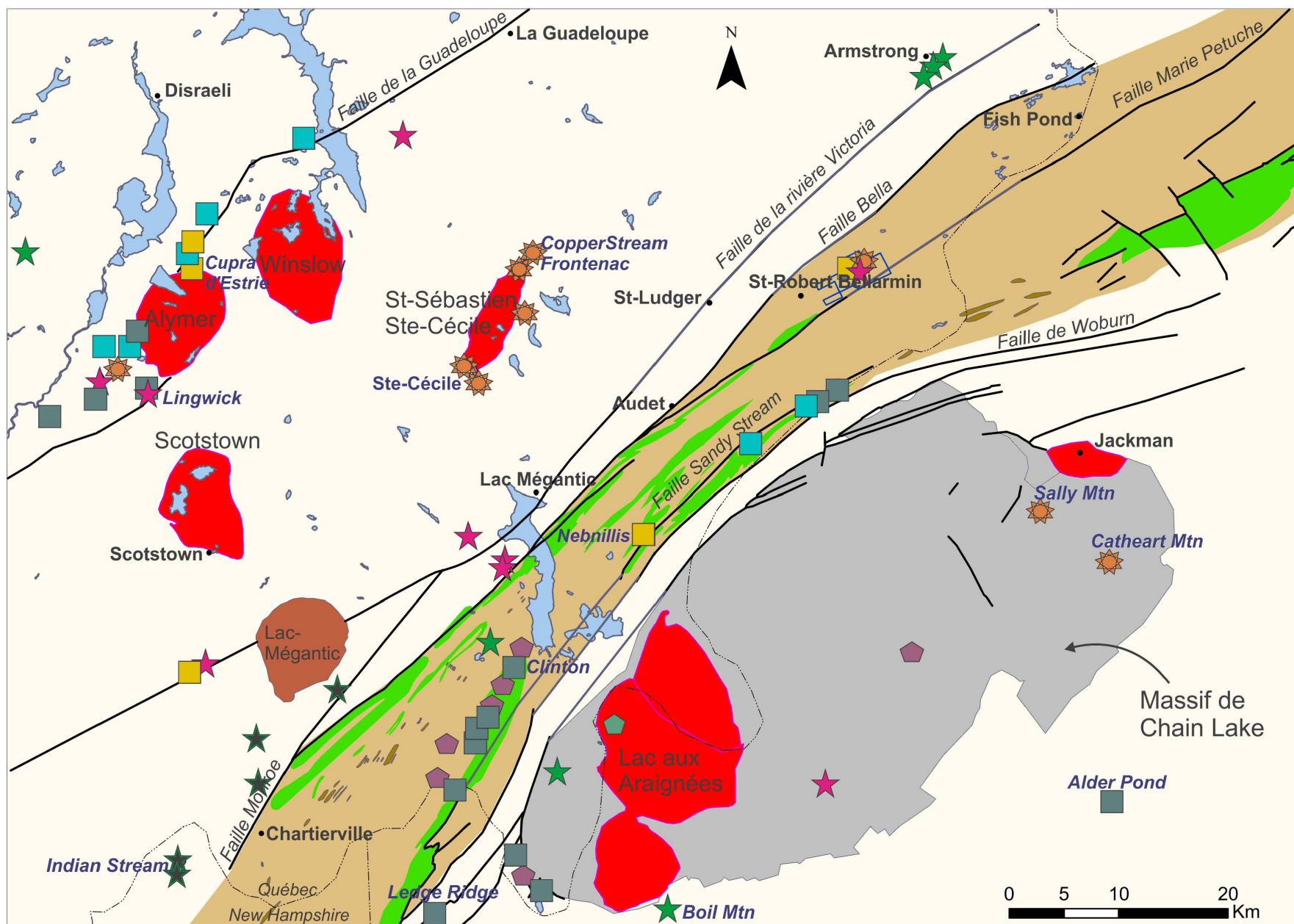
Gîtes porphyriques et autres minéralisations associées aux granitoïdes

Le cuivre et le molybdène se retrouvent également dans des porphyres à Cu-Mo tels que dans les secteurs des gîtes de Catheart Mountain et de Sally Mountain (Maine). Le gîte de Catheart Mountain est de plus caractérisé par la présence de rhénium. Dans le sud du Québec, ce type de gîte est observé en périphérie du pluton de Ste-Cécile-St-Sébastien (Québec). Dans ce secteur, deux gîtes d'importance ont été découverts :

- Le gîte de Copperstream-Frontenac situé au nord du pluton dont les réserves de minerai ont été évaluées par Rio Tinto à 582 900 tonnes avec une teneur en Mo de 0,54 %. Ce projet de la compagnie Globex a été actif jusqu'en 2010.
- Le vieil indice de Ste-Cécile, au sud du pluton, qui contient environ 2 millions de tonnes de minerai avec des teneurs en Mo de 0,31 % et d'importants sous-produits dont les concentrations peuvent atteindre des teneurs de 579,5 g/t d'Ag, 0,34 g/t d'Au, 3,2 % Zn, 5,75 % Pb et 0,19 % Bi.

Les minéralisations de ces deux gisements se trouvent dans des dykes porphyriques et des veines de quartz parallèles au grain tectonique des Appalaches.

Les terrains du nord du Maine ont été très peu explorés et, compte tenu de la quantité d'indices présents du côté québécois de la frontière, nous pensons que cette région devrait faire l'objet d'une activité d'exploration minière plus soutenue. Les principales cibles d'explorations dans la région sont les failles régionales, les intrusions dévoniennes, les volcanites siluro-dévoniennes et même les métasédiments puisque la présence de gîtes ou d'indices de type SEDEX a également été prouvée.




















	Lacs		Placers Au
	Plutons Dévonien		Au orogénique
	Pluton Crétacé		Filon qz Au-Ag
	Massif de Chain Lake		Porphyres Cu et/ou Mo (\pm Au, Ag, W)
	Formation de Frontenac : Membre sédimentaire		Cu-Ag \pm Pb, Zn, Au
	Formation de Frontenac : Volcanites		VMS (Zn Pb et/ou Cu)
	Formation de Frontenac : Gabbros - diorites		SEDEX (Zn Pb et/ou Cu)
	Faillles régionales		filon de qz (Zn Pb et/ou Cu)
			Cr

Figure 2.20 : Carte des indices minéralisés et des gisements de la région du lac Mégantic. Compilation d'après les données de l'USGS (<http://mrdata.usgs.gov/mrds/>) du MRNF, des cartes de Lebel et Tremblay (1993); Lyons et al. (1997); Marvinney (1986) et Osberg et al. (1985).

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE DE LA PROPRIETE ST-ROBERT

Dans ce chapitre, une description des différentes lithologies, ainsi que les structures et les altérations rencontrées sur la propriété seront présentées. Ces observations géologiques serviront à préciser les contextes géologique, géodynamique et métallogénique de la propriété St-Robert.

La propriété St-Robert est surplombée par deux sommets : la Montagne des Mines culminant à 501 mètres entre les zones sud et centre de la propriété, et un autre sommet situé à l'ouest de la propriété culminant à 544 mètres. La rivière du Loup (anciennement appelée Linière) traverse la propriété du sud vers le nord. À l'est de la zone minéralisée Nord, la rivière creuse une dépression jusqu'à un niveau de 373 mètres d'altitude. Les ruisseaux Caouette et Yves, respectivement à l'est et à l'ouest de la rivière du Loup, drainent également la propriété pour rejoindre la rivière du Loup (Fig. 3.1).

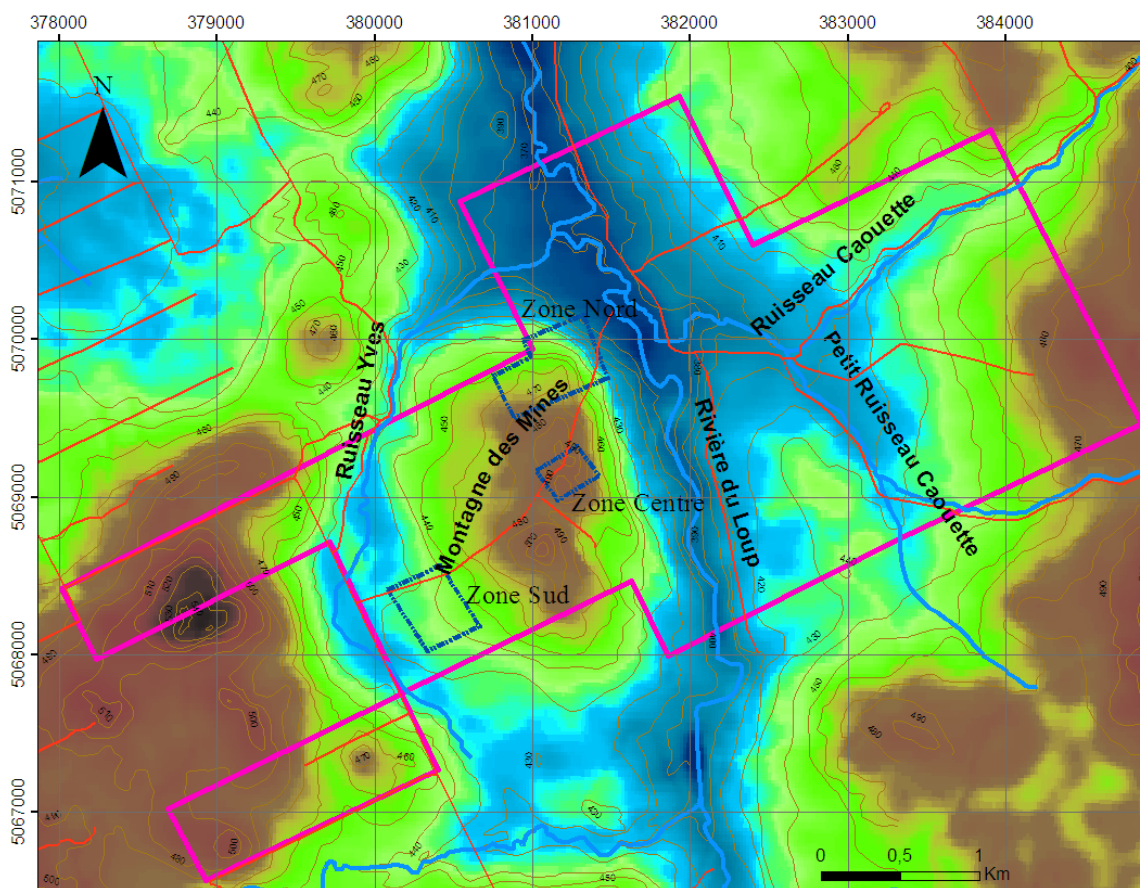


Figure 3.1 : Matrice topographique du secteur de la propriété de St-Robert. Le cadre magenta représente les limites des concessions minières actives de la compagnie Les MINES J.A.G Itée. Modèle numérique de terrain calculé à partir des données CanVec au 1 : 50 000 du RNCan.

La région de la Beauce a subi trois avancées glaciaires importantes à l'Illinoien, au Sangamonien et au Wisconsinien, dont la plus récente date de plus de 12 000 ans. Ces glaciations ont créé un vaste manteau de tills d'épaisseurs variables. De ce fait, les formations quaternaires sont très présentes sur la propriété, rendant difficile une étude de surface détaillée. En effet, environ 90 % de la propriété est recouverte de dépôts pouvant atteindre jusqu'à 60 mètres d'épaisseur dans le secteur de la zone minéralisée Centre. Ces dépôts sont principalement composés de tills glaciaires, d'alluvions et de sols. Géophysique G.P.R International a effectué un levé sismique sur la propriété en 1983 (voir chapitre 6) et, sur la base des contrastes de vitesse sismique, suggère une subdivision du mort-terrain en deux couches (Koita, 2011) : une couche de terre-sable-blocs en surface et l'autre de dépôts plus argileux en profondeur.

Les sols de la région de Beauce Sud se sont développés dans une région sujette à un climat continental tempéré à hivers froids et étés chauds (Peel et al., 2007). Dans ce contexte climatique, les fortes précipitations annuelles et les propriétés de drainage des sols ont favorisé la formation de sols podzoliques (voir chapitre 4).

3.1 Cartographie géologique

Lors de l'été 2011, nous avons effectué une cartographie détaillée de la propriété. Cette cartographie a consisté en la caractérisation des principales lithologies rencontrées et la mesure des structures géologiques associées (S0, S1, failles, ...) dans le but de réaliser une carte géologique complète des affleurements visibles sur la propriété.

Une grande partie de cette cartographie avait déjà été effectuée par Frédéric (1977, 1983 et 1984) dans les années 80 mais, à défaut de référencement géographique, nous avons été dans l'obligation de cartographier le terrain à nouveau tout en géoréférençant les affleurements et structures à l'aide d'un GPS GARMIN MAP 62.

Comme expliqué précédemment, le mort-terrain est parfois très épais au sein de la propriété, de ce fait, très peu d'unités géologiques affleurent ce qui rend difficile la réalisation d'une carte géologique. En effet, aucun contact sédimentaire n'a pu être observé sur le terrain.

La figure 3.2 montre l'emplacement des affleurements rocheux visibles sur la propriété St-Robert.

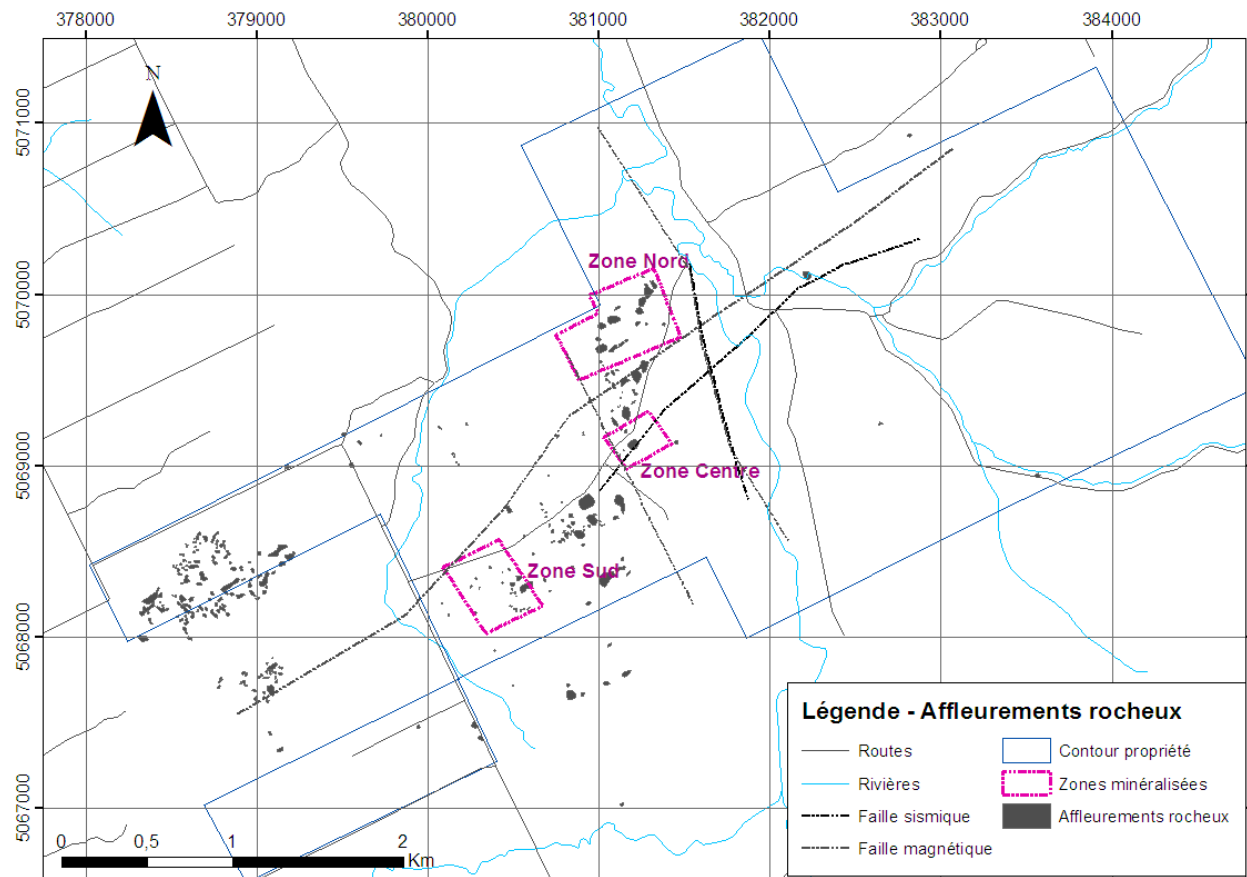


Figure 3.2 : Répartition des affleurements rocheux visibles sur la propriété St-Robert.

Une compilation des observations de terrain est présentée dans la figure 3.3. Les lithologies présentées sur cette carte sont détaillées dans le sous-chapitre suivant.

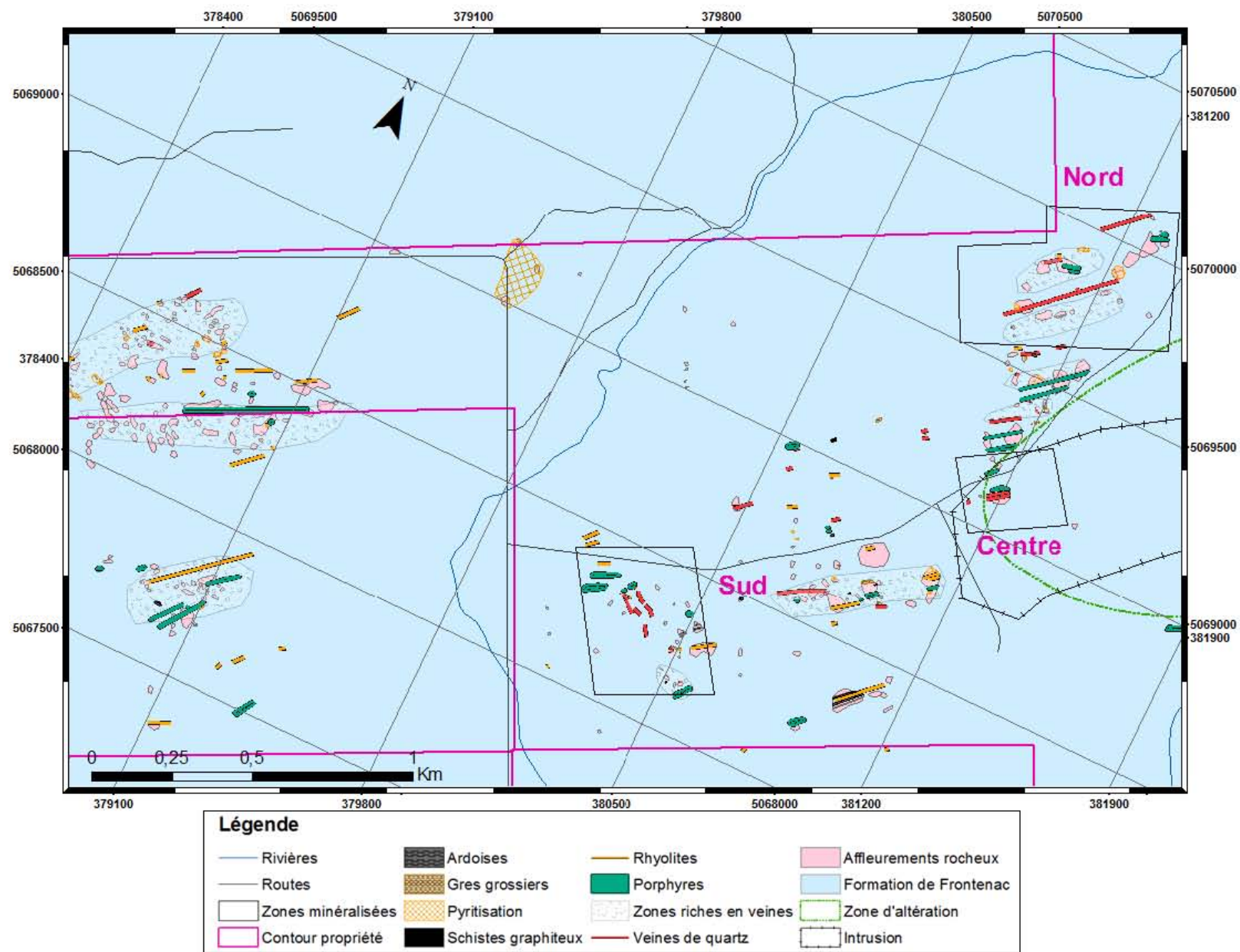


Figure 3.3 : Carte de compilation de la géologie centrée sur les zones affleurantes de la propriété.

3.2 Lithologies

3.2.1 Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires de la propriété de St-Robert font partie de la Formation siluro-dévonienne de Frontenac.

En l'absence de carottes de forage, seuls les affleurements visibles nous ont aidés à caractériser les roches sédimentaires. De plus, compte tenu du recouvrement quaternaire important, il est très difficile d'observer une séquence sédimentaire complète sur la propriété St-Robert.

Globalement, les roches sédimentaires sont constituées majoritairement de grès gris-brun à grains fins non triés assez massifs majoritairement de type litharénites (Fig. 3.4) et d'argilites gris foncé à bleuté. Ces dernières sont très marquées par la schistosité régionale et présentent des plissements micrométriques dont les axes sont parallèles à la schistosité (Fig. 3.5). On retrouve également quelques unités de quartzites, de schistes graphiteux et d'ardoises.

De nombreux auteurs s'accordent pour dire que cette séquence de roches sédimentaires serait des turbidites clastiques (Cattalani, 1987; Frédéric, 1983; Gauthier et al., 1994). Toutefois, nous n'avons pas observé de turbidites classiques montrant la séquence de Bouma et les grès de la propriété ont généralement une allure massive.

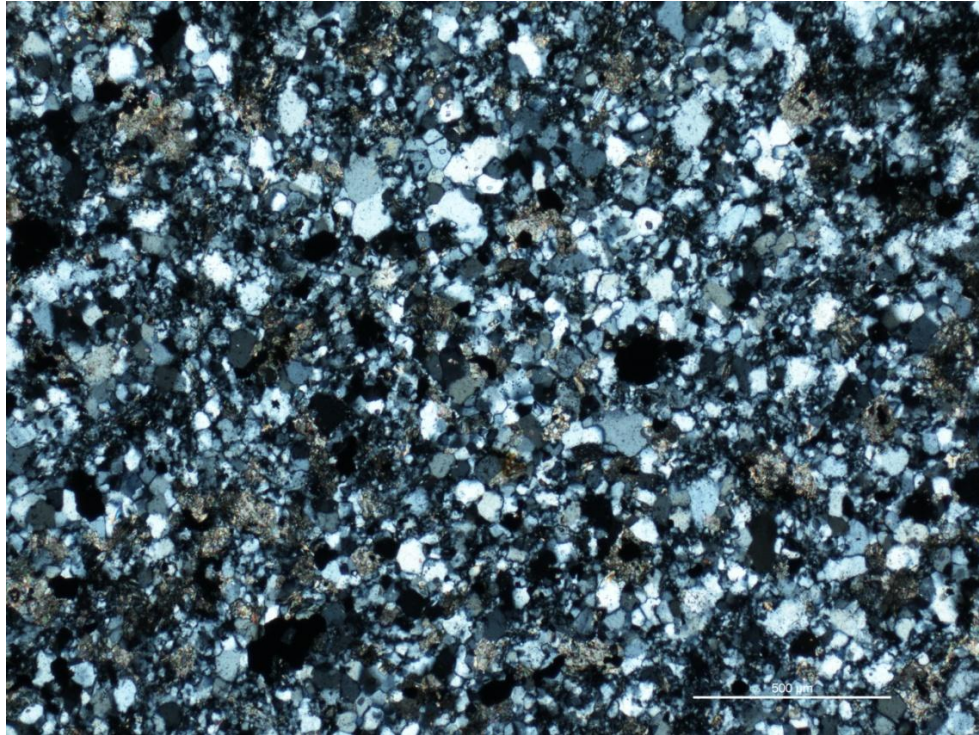


Figure 3.4 : Grès massif photographié à partir de l'échantillon SR07 de la zone Centre. Lumière transmise polarisée. La barre d'échelle représente 500 μm .

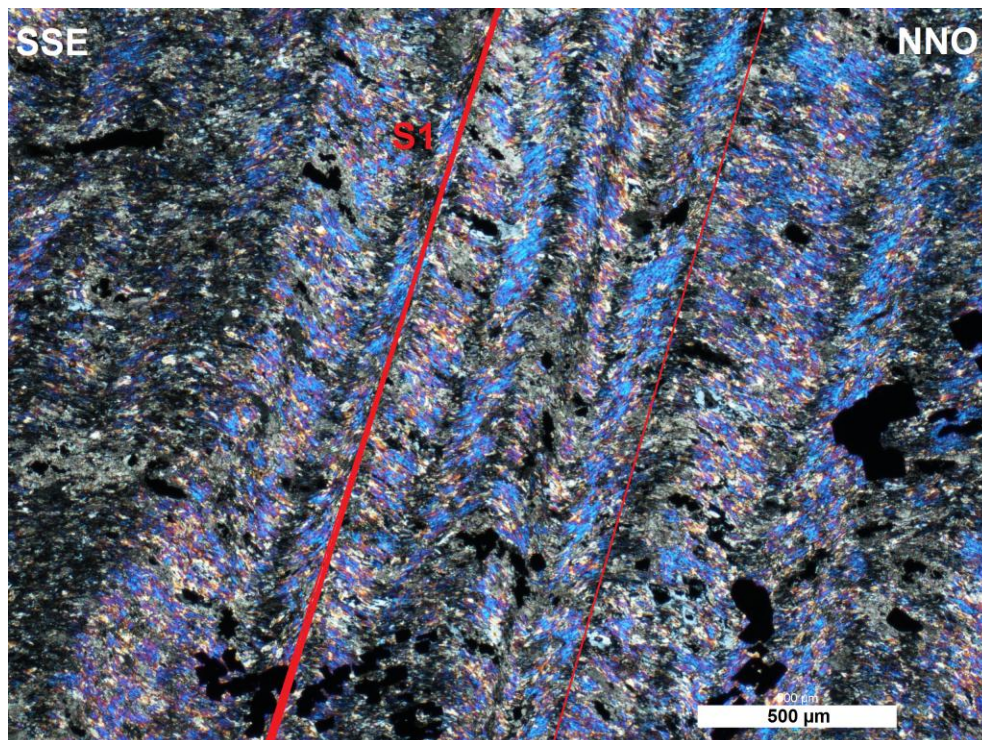


Figure 3.5 : Argilite plissée photographiée à partir de l'échantillon SR11 de la zone Centre. Lumière transmise polarisée.

3.2.2 Roches ignées

Les dykes observés sur la propriété se présentent sous la forme de filons de puissance allant d'une dizaine de centimètres à quelques mètres, orientés parallèlement à la schistosité et donc au grain structural de cette région des Appalaches.

De par la grande variabilité de l'altération dans les roches intrusives de la propriété, il est difficile de déterminer macroscopiquement la nature de celles-ci. Deux grands types de roches intrusives ont été observés en surface au sein de la propriété (Fig. 3.3) :

1. Des **porphyres quartzo-feldspathiques** décrit par Cattalani (1987) comme étant des dykes granodioritiques composés de phénocristaux de feldspath et de quartz faisant généralement de 1 à 5 millimètres compris dans une matrice quartzo-feldspathique aphanitique. Des reliques de hornblende et de biotite sont également présentes. Ces roches sont généralement de couleur vert - bleu, mais présentent très souvent une enveloppe d'altération météorique brune variant de un centimètre dans les roches les plus massives jusqu'à 10 centimètres (Fig. 3.6).

D'après Cattalani (1987), qui a étudié les roches intrusives très en détail, la majorité des minéraux et textures de ces dykes est issue d'une altération hydrothermale intense. Les feldspaths sont en effet intensément séricitisés (Fig. 3.7), les phénocristaux de quartz et de feldspath sont envahis par du quartz plus tardif, la matrice contient des amas de quartz et de feldspath potassique granophyriques et les minéraux mafiques sont largement pseudomorphosés par la chlorite, la calcite, la séricite, le rutile et le leucoxène.



Figure 3.6 : Dyke porphyrique quartzo-feldspathique de type (1) et son enveloppe d'altération météorique. Échantillon SR04 de la zone Centre.



Figure 3.7 : Dyke porphyrique quartzo-feldspathique de type (1). Échantillon SR06 de la zone Centre. La barre d'échelle représente 1000 µm.

2. Des **rhyolites blanchâtres** vert-pâle à blanches, composées principalement d'yeux de quartz et de plagioclases dans une matrice quartzo-feldspathique majoritairement aphanitique intensément séricitisée et silicifiée (Fig. 3.8).

Cependant, compte tenu de l'altération, il se peut que les rhyolites soient en réalité des dykes granodioritiques relativement aphyriques.



Figure 3.8 : Rhyolite blanchâtre intensément séricitisée et silicifiée de type (2).

Des **dykes mafiques**, déterminés par Cattalani (1987) comme étant des dykes lamprophyriques, ont également été répertoriés lors des forages et ils recoupent les dykes felsiques avec des angles variables. La partie pétrogéochimie concernant ces roches est représentée au chapitre 5.

La distribution spatiale des nombreux dykes suggère la présence d'une intrusion granodioritique en profondeur apparentée aux cinq intrusions dévoniennes visibles dans la région de St-Robert (chapitre 2). Avec l'aide de la carte du champ magnétique total, nous pouvons apercevoir les contours de cette intrusion masquée par la présence de roches sédimentaires et de dépôts quaternaires (Fig. 3.9). En effet, cette masse intrusive est particulièrement bien délimitée sur la carte de l'intégration verticale des données du champ magnétique total.

La méthode de l'intégration verticale permet de souligner les grandes structures régionales responsables des anomalies de basses fréquences observées sur les cartes magnétiques. Mathématiquement, ce traitement correspond à l'inverse de la dérivée verticale (Koita, 2011 et Richer-LaFlèche, 2010). Dans ce mémoire, cette intrusion sera bien souvent appelée « intrusif de St-Robert ». Une description plus détaillée de la géophysique de la propriété sera présentée dans le chapitre 6.

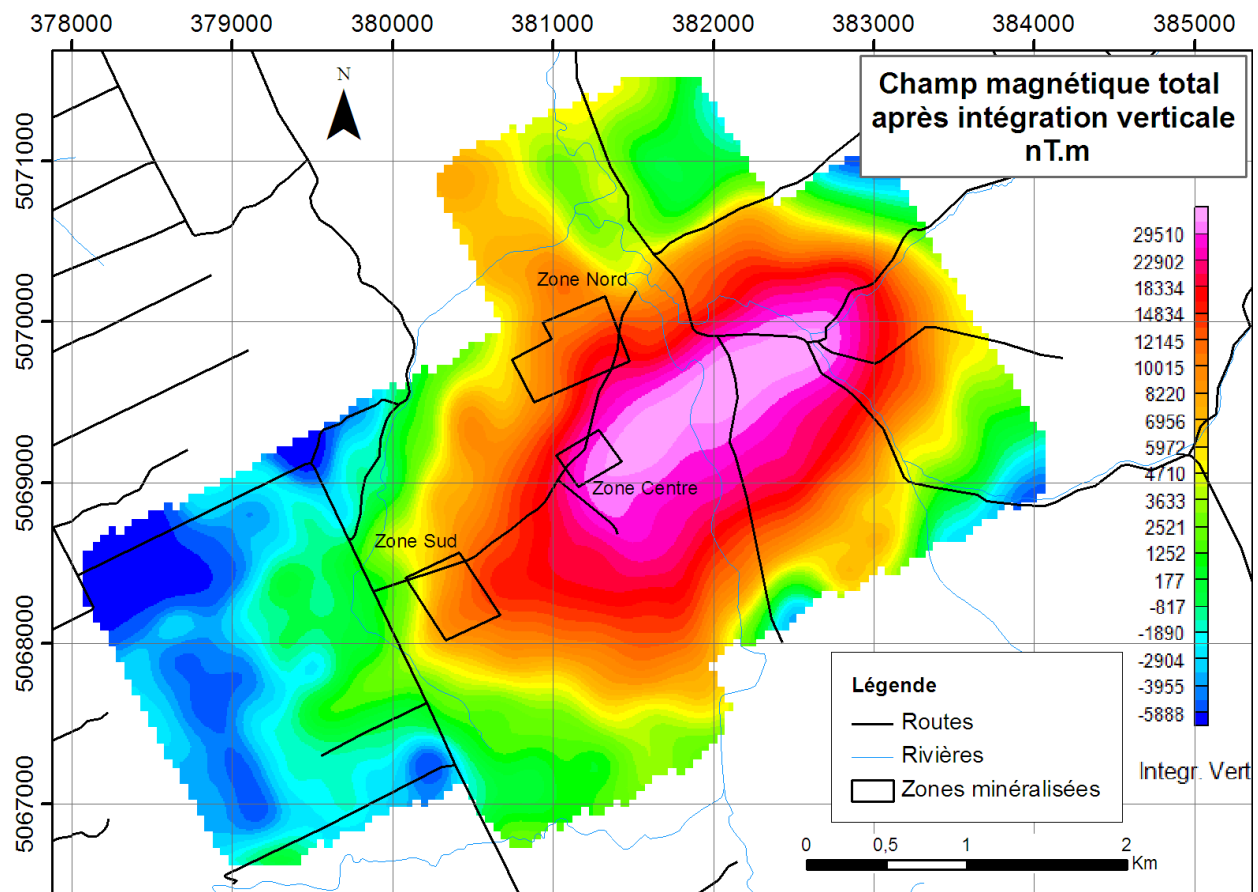


Figure 3.9 : Carte du champ magnétique total (nT.m) après intégration verticale. D'après les données compilées par Koita (2011). UTM, NAD 1983, zone 19N.

3.2.3 Veines de quartz

Malgré la présence d'un mort-terrain localement très épais, une trentaine de veines de quartz massives plus ou moins minéralisées sont visibles au sein de la propriété (Fig. 3.3). Ces veines de quartz varient en largeur d'environ 10 centimètres à presque un mètre, et certaines peuvent être suivies sur la propriété sur plus de 350 mètres (Fig. 3.13). Globalement, ces veines recoupent les roches sédimentaires siluro-dévonniennes de la Formation de Frontenac et sont parallèles aux dykes porphyriques quartzo-feldspathiques excepté pour la zone Sud où quelques dykes porphyriques les recoupent.

Cattalani (1987) a étudié des inclusions fluides dans le quartz, la scheelite et la sphalérite et a effectué des déterminations isotopiques de l'oxygène et du soufre. Les données thermogéochimiques issues de cette étude indiquent que les fluides minéralisateurs avaient des températures variant entre 220 et 245 °C. Selon Cattalani (1987), les conditions de pressions pendant la formation de ces veines de quartz étaient faibles et largement hydrostatiques. Ces fluides étaient de faibles salinités (0 à 8 % poids de NaCl équivalent), contenaient des quantités variables de H₂O, CO₂, CH₄ et N₂ et avaient un pH compris entre 3 et 5. Le $\delta^{18}\text{O}$ de ces fluides est environ égal à 0 ‰ indiquant une source météorique pour l'origine des fluides minéralisateurs. Des fluides post-minéralisations de faible salinité et contenant du Na et Ca en solution ont également été piégés dans les inclusions fluides et ont démontré des températures de piégeage comprises entre 140 et 210 °C.

Bien que l'on retrouve de ces veines de quartz sur toute la superficie de la propriété, la plupart des veines de quartz minéralisées sont regroupées en trois zones d'intérêt économique (Fig. 3.3).

3.2.3.1 Zone Sud

La **zone Sud**, décrite par Frédéric dans les années 1980, est riche en Pb, Zn et Ag et sa dimension est de 400 mètres de long sur 250 mètres de large (Fig. 3.10). Cette dernière est reconnue pour contenir sept principales veines de quartz minéralisées d'orientation N120°. En surface, ces veines varient entre 10 et 70 centimètres de large et on peut les suivre parfois sur 80 mètres de long.

La particularité de cette zone est l'orientation de ces veines à environ N120° alors que la majorité des structures de la propriété ainsi que les autres veines de quartz minéralisées des zones Centre et Nord sont orientées N50°.

De plus, alors que les veines des zones Centre et Nord sont subverticales, les veines de la zone Sud ont un pendage variant de 30 à 50 degrés vers l'est. C'est dans cette zone qu'Eugène Larochelle obtiendra en 1934, pour un échantillon choisi, des valeurs de 908 g/t d'Ag, 19 % de Pb et 3,5 % de Zn. La figure 3.10 montre les veines de quartz que nous avons pu répertorier et échantillonner. Une trentaine d'échantillons ont été prélevés dans cette zone.

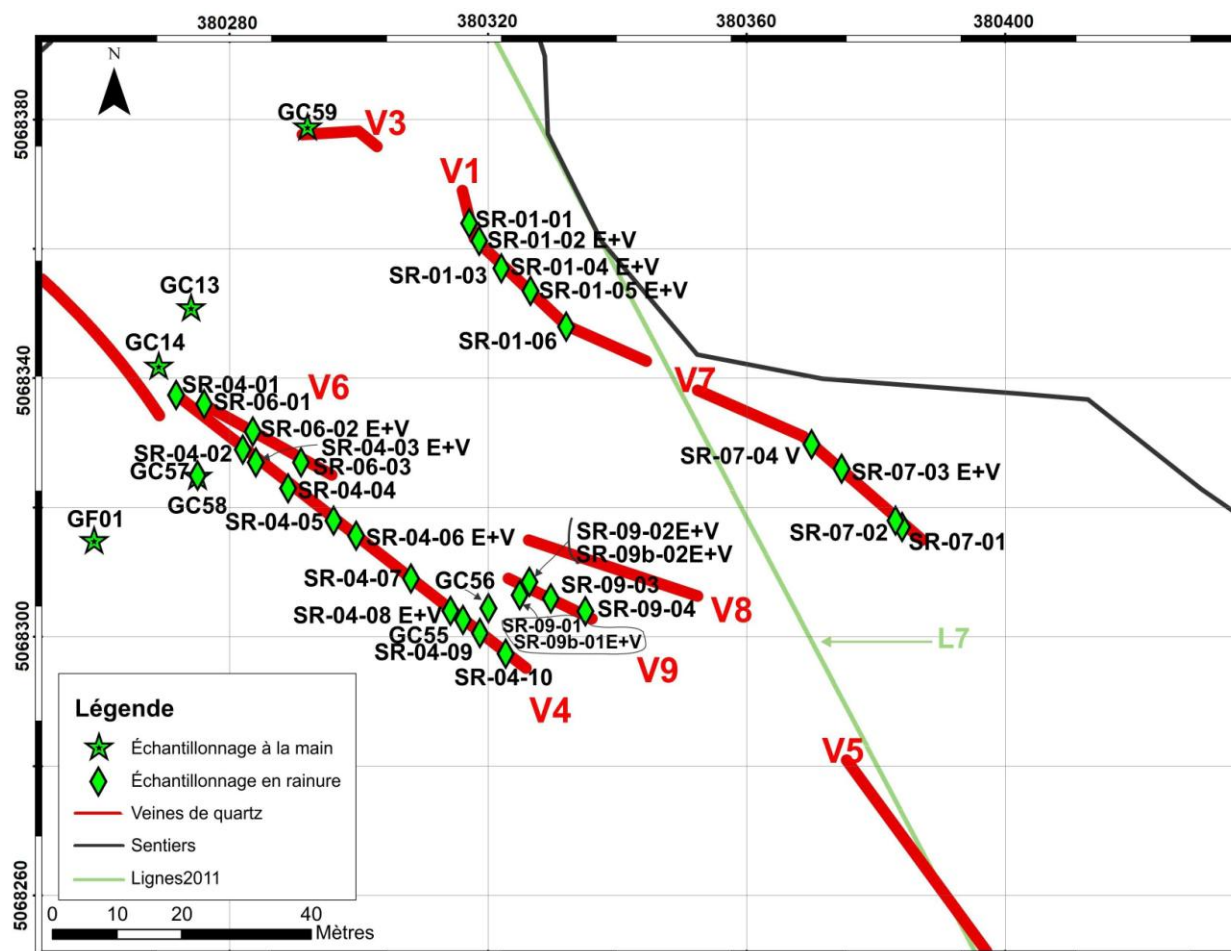


Figure 3.10 : Veines de quartz principales de la zone Sud. Les points verts représentent les échantillons prélevés.

3.2.3.2 Zone Centre

La **zone Centre**, étudiée depuis très longtemps pour son potentiel en or et en tungstène recouvre une surface de 200 mètres de large par 200 mètres de long (Fig. 3.3). Cette zone est malheureusement affectée par une très grande épaisseur de dépôts quaternaires rendant difficile l'exploration. C'est dans le but de parer à ce problème que le tunnel « shaft Lacombe » a été construit dans la fin des années 1800 à la suite de la découverte d'une veine de quartz contenant de l'or. Il existe néanmoins un affleurement appelé « Falaise » d'environ 30 mètres de large sur trois mètres de haut au sein de cette zone qui nous a permis de l'étudier sans avoir à dénoyer le tunnel (Fig. 3.11). Quatre veines de quartz subverticales ont été découvertes contenant des minéralisations en Ag, Pb et WO_3 et orientées $N50^\circ$ (Fig. 3.12). De très hautes valeurs en or ont également été interceptées par des sondages dans les années 1950.

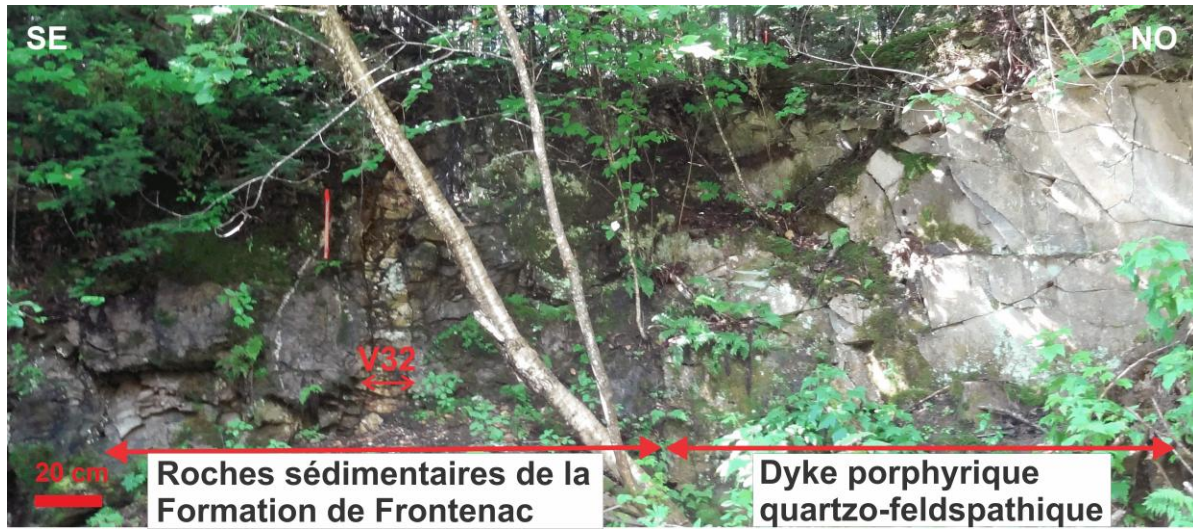


Figure 3.11 : Affleurement principal de la zone Centre.

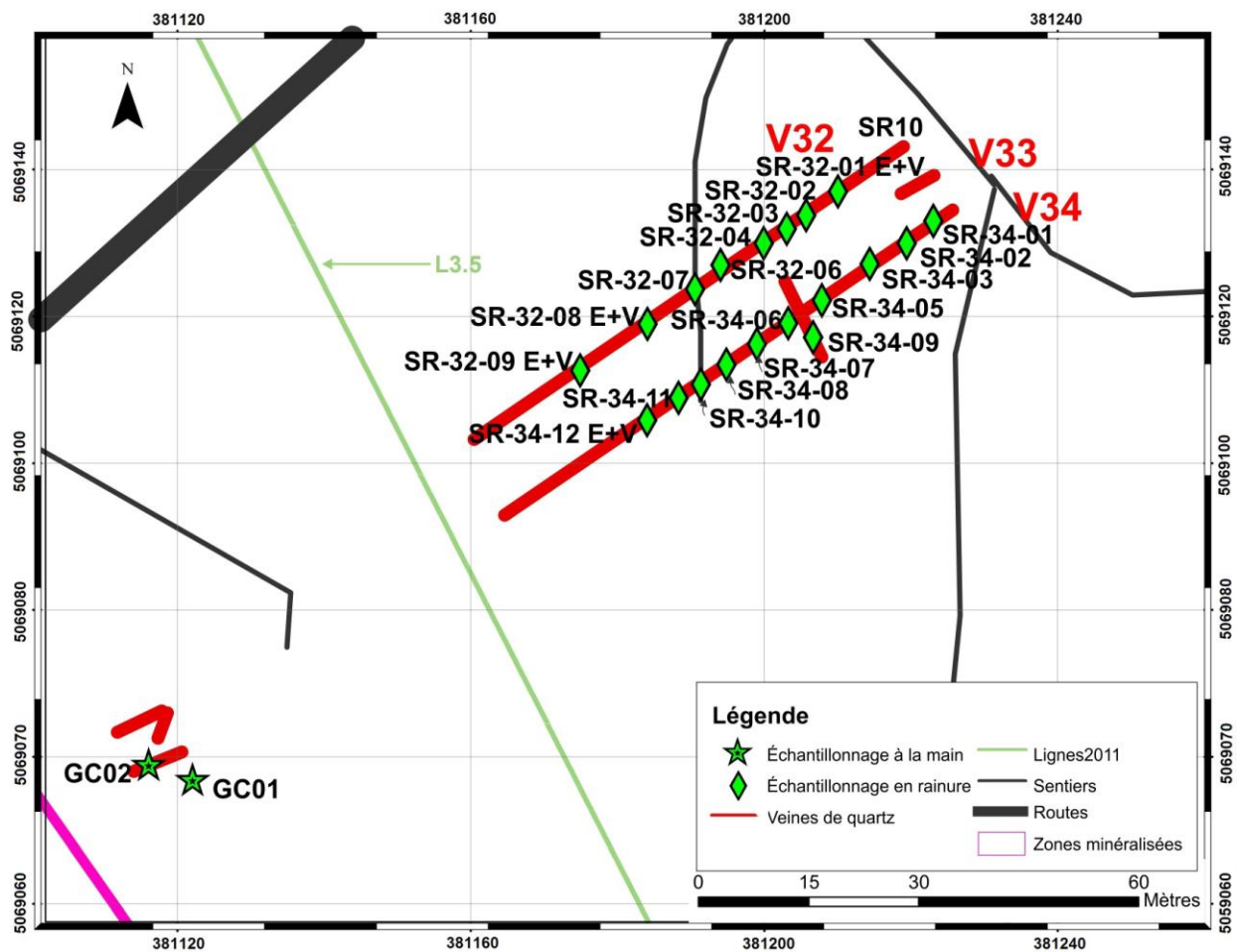
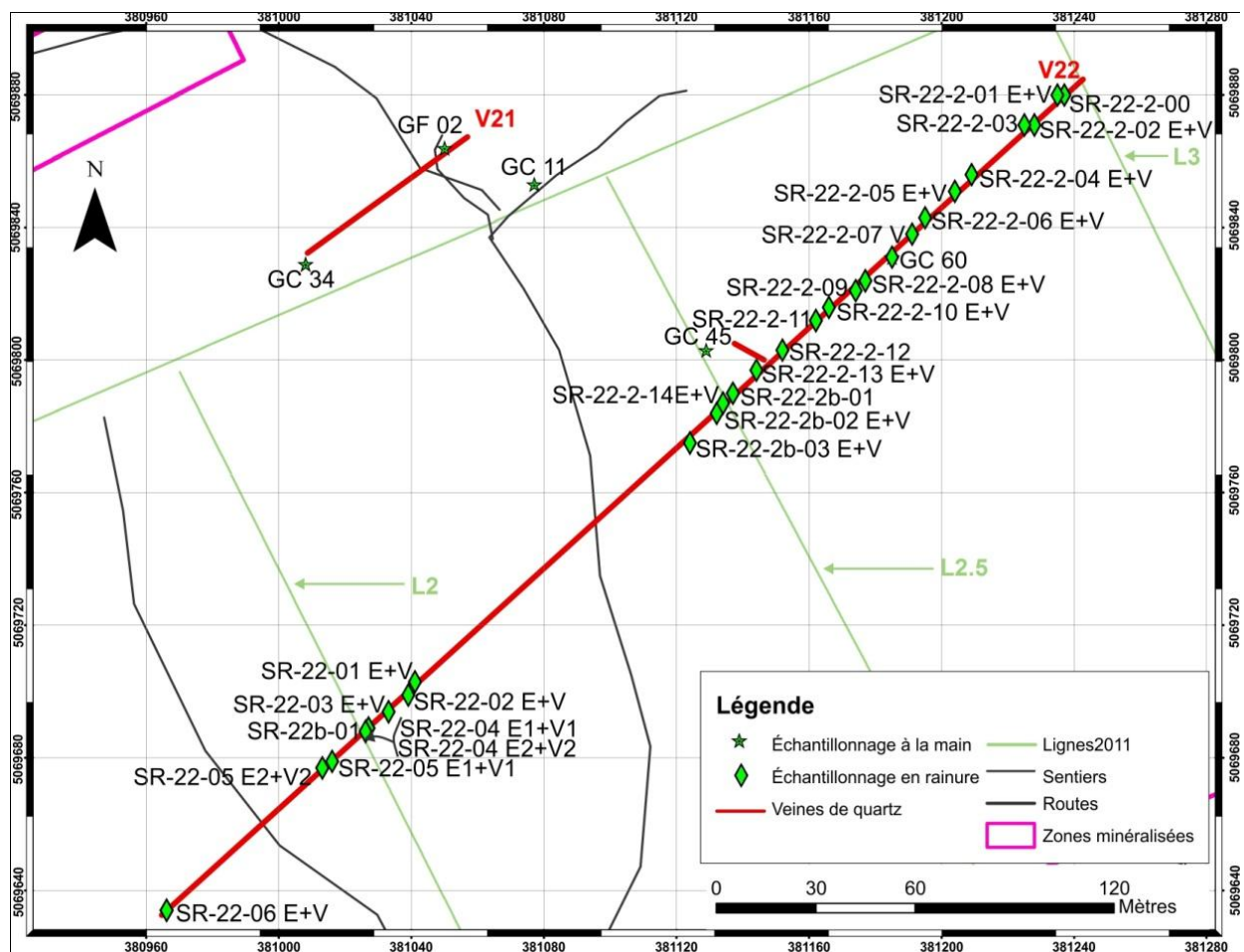


Figure 3.12 : Principales veines de quartz de la zone Centre. Les points verts représentent les échantillons prélevés.

3.2.3.3 Zone Nord

La **zone Nord**, située près des anciennes installations minières de la *St-Robert Metals* et du tunnel Lee, renferme trois veines de quartz principales orientées N55° et pouvant atteindre 350 mètres de long (Fig. 3.13 et 3.14). Cette zone contient des minéralisations visibles en plomb et bismuth et probablement aussi en argent.

La « découverte Lachance » se situe également dans cette zone et correspond à un dyke rhyolitique contenant de la scheelite disséminée en quantité économique. Les dykes porphyriques recoupés par les anciens forages ont malheureusement rarement fait l'objet d'analyses.



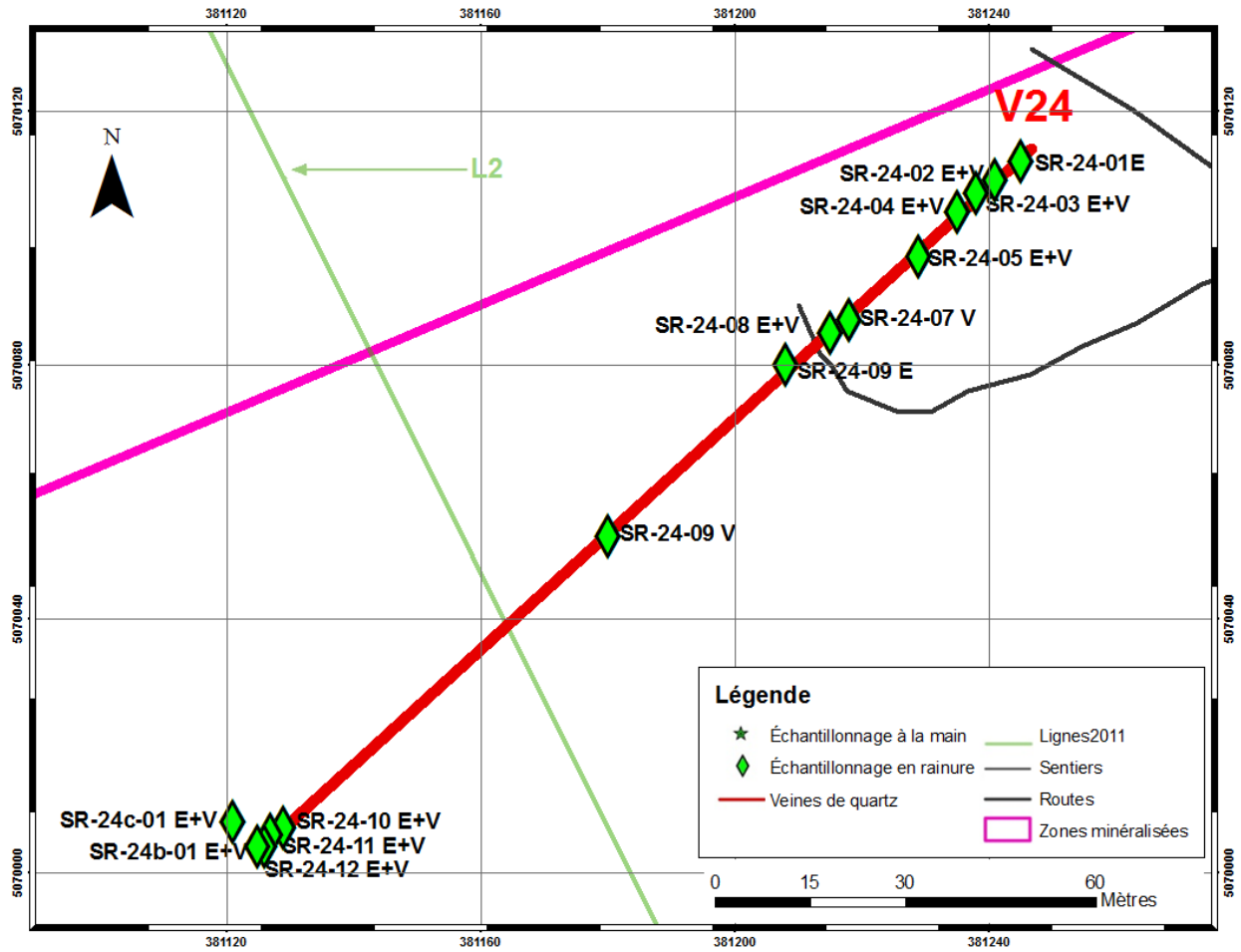


Figure 3.14 : Veine 24 de la zone Nord. Les points verts correspondent aux échantillons prélevés sur le terrain.

3.3 Structures

Les structures sont difficilement visibles au sein de la propriété de par l'importance du mort-terrain et le faible pourcentage d'affleurements sur le terrain. La majorité des structures géologiques observées sur la propriété sont orientées NE-SO selon le grain structural dominant de l'orogène acadienne. Marleau (1968) et Chevé (1990) ont déterminé que la Formation de Frontenac au sud du Québec formait une structure synclinale. Lafrance (1995) a classé la région du lac Mégantic en trois domaines structuraux différents et indique que le domaine situé au sud-est de la faille de la rivière Victoria, dans lequel est comprise la Formation de Frontenac, est le domaine où l'intensité de déformation est la plus forte.

Sur la propriété St-Robert, la schistosité S1 est de loin la fabrique structurale la plus visible, démontrant la forte intensité de la déformation évoquée par Lafrance (1995; Fig.3.18). Dans les argilites (roches moins compétentes), il s'agit d'une schistosité de crénulation où le litage (S0) à l'intérieur des microlithons est déformé en microplis (Fig. 3.5) tandis que dans les grès plus massifs, la schistosité est une schistosité de fracture. Sur le terrain, la stratigraphie S0 est bien souvent masquée par cette schistosité très pénétrative, mais, lorsqu'elle est observée, elle est déformée par des plis ouverts. Les plans axiaux sont subverticaux et parallèles aux plans de schistosité (Fig. 3.15) et les plis plongent faiblement de 10 à 20° vers le nord-est ou le sud-ouest. Les plis semblent antérieurs à la schistosité puisqu'ils n'affectent pas cette dernière. Les roches les plus compétentes, où l'on peut observer une stratification, montrent plusieurs failles parallèles à la schistosité et la présence de nombreux crochons de faille.

Dans les archives, la présence d'une faille majeure, également parallèle à la schistosité, est très souvent évoquée (Cattalani, 1987; Frédéric, 1983). Cependant, nous n'avons pas pu apercevoir d'évidences géologiques de surface de son existence et la totalité des failles observées sur le terrain montraient un déplacement apparent de quelques centimètres et correspondaient à des failles inverses. Nous verrons toutefois dans le chapitre 6 que les données sismiques montrent une variation abrupte d'épaisseur de dépôts quaternaires et une zone linéaire d'atténuation de la vitesse de propagation des ondes sismiques compatible avec la présence d'une faille.

Cette orientation préférentielle affecte également les veines de quartz des zones Centre et Nord puisqu'elles sont également parallèles à la schistosité (Fig. 3.17 et 3.16). Il semblerait que ces veines se soient mises en place dans des plans de faiblesses tels que les failles ou les plans de schistosité indiquant donc que la minéralisation est postérieure à la déformation principale acadienne.

Les veines de la zone Sud ont, quant à elles, une direction d'environ N120°, faisant un angle d'environ 70 degrés par rapport à la direction régionale des Appalaches (Fig. 3.17 et 3.18). De plus, nous verrons dans le chapitre 6 que d'autres failles traversent la propriété suivant la même orientation que les veines de la zone Sud. Dans un contexte où le socle pourrait être présent à seulement quelques kilomètres sous la propriété (Bernard, 1987; De Souza et Tremblay, 2010; Pinet et Tremblay, 1995), ces structures d'orientation différente pourraient être associées à une réactivation en surface d'anciennes structures du socle comme par exemple, les failles transformantes créées lors du rifting du supercontinent Rodinia. Ces veines semblent s'être mises en place avant ou en même temps que les dykes de la zone Sud puisque ces derniers les recoupent à certains endroits. Aucun recoupement n'est visible dans les zones Centre et Nord, empêchant donc de déterminer la chronologie relative des événements dans ces zones.

Des veines de quartz subhorizontales sont également observées, principalement dans les zones Centre et Nord de la propriété, et recoupent les veines subverticales. Leur direction est quasiment perpendiculaire à la direction des plans de schistosité (Fig. 3.17b).



Figure 3.15 : Schistosité de fracture et plis dans les grès massifs de l’affleurement principal de la zone Centre.

La schistosité régionale, les failles locales et les failles régionales telles que les failles de Woburn et de la rivière Victoria se sont probablement formées durant le paroxysme de la compression acadienne. Aucune structure de cisaillement n'a été observée dans les veines de quartz, mais on retrouve cependant quelques diaclases parallèles à la schistosité dans certaines veines. De ce fait, il est probable que ces dernières se soient formées à la fin de l'orogénèse acadienne, lorsque les contraintes à l'origine de l'orogène n'étaient plus très fortes mais néanmoins présentes. De même, des diaclases parallèles à la schistosité au sein de nombreux dykes porphyriques suggèrent qu'ils se sont formés lorsque l'orogène acadienne était encore active. La différence de compétence entre les dykes et les roches sédimentaires explique leur différence de déformation. L'absence de cisaillement dans les veines et la nature linéaire non déformée des veines de quartz orientées NE-SO pourrait impliquer une phase d'extension tardive au Dévonien. Ceci est compatible avec les sections d'audiomagnétotellurisme présentées dans le chapitre 6.

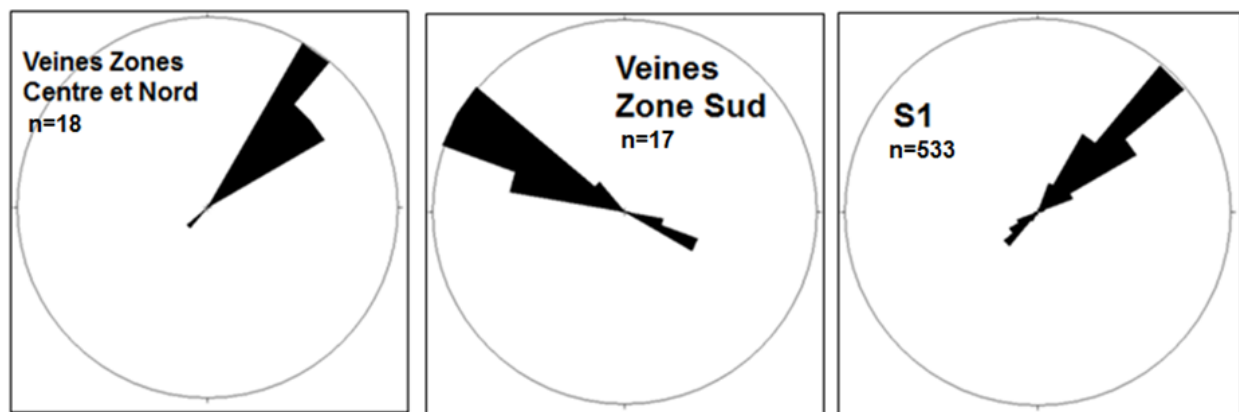


Figure 3.16 : Diagramme de rose pour les mesures des directions des veines des zones Centre et Nord (à gauche), pour les mesures des directions des veines de la zone Sud (au milieu) et pour les schistosités des affleurements (à droite). (n) représente le nombre de mesures.

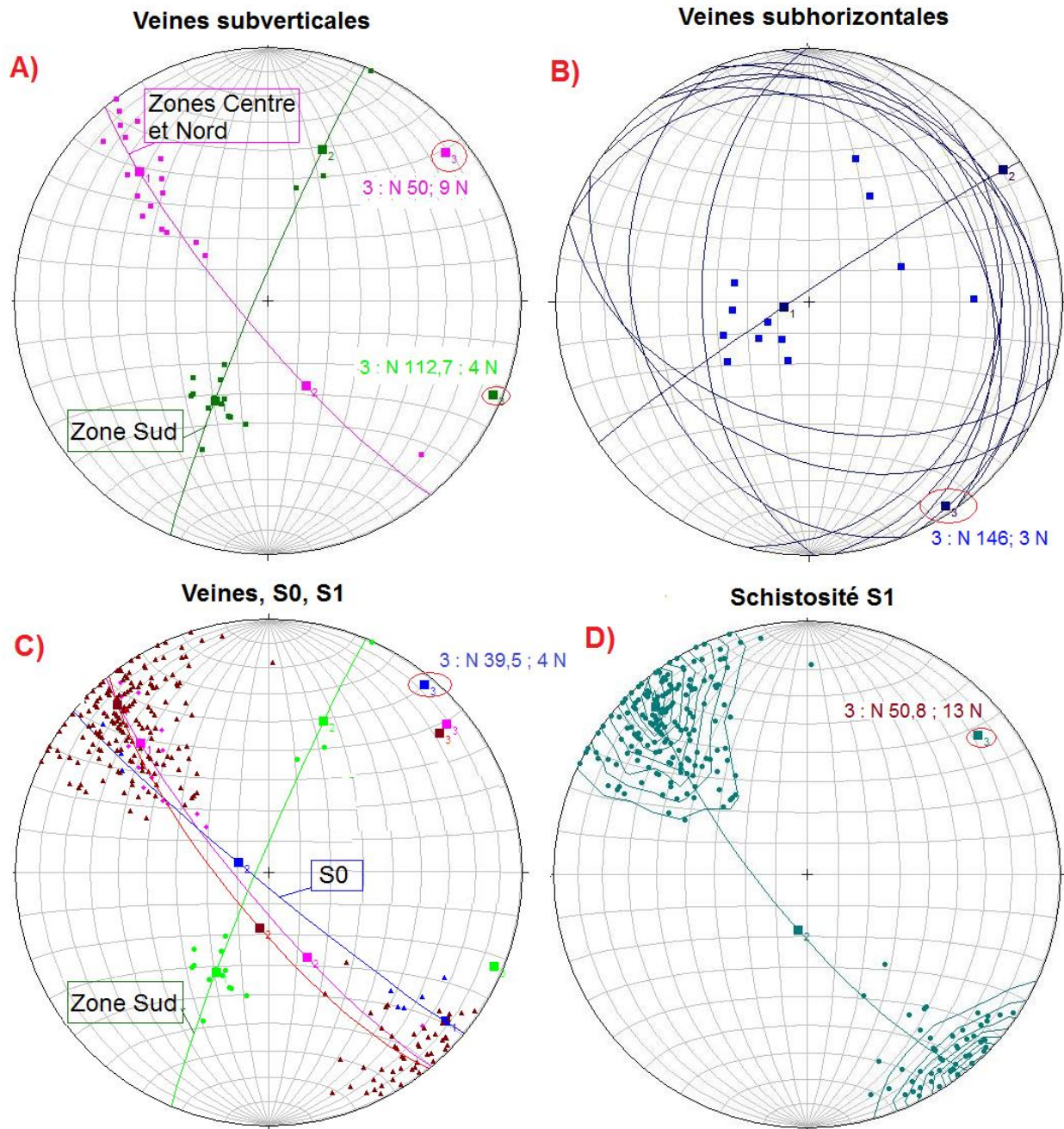


Figure 3.17 : Stéréonets de Wulff (hémisphère inférieur). A) Mesures des directions et pendages des veines des zones Centre et Nord (nombres de mesures $n = 18$) et des veines de la zone Sud ($n=17$). B) mesures des directions et pendages des veines subhorizontales C) mesures des directions et pendages de la stratification S0 (en bleu, $n= 8$). D) mesures de directions et pendages de la schistosité S1 observée ($n=266$). 3 correspond à la direction de la contrainte maximale.

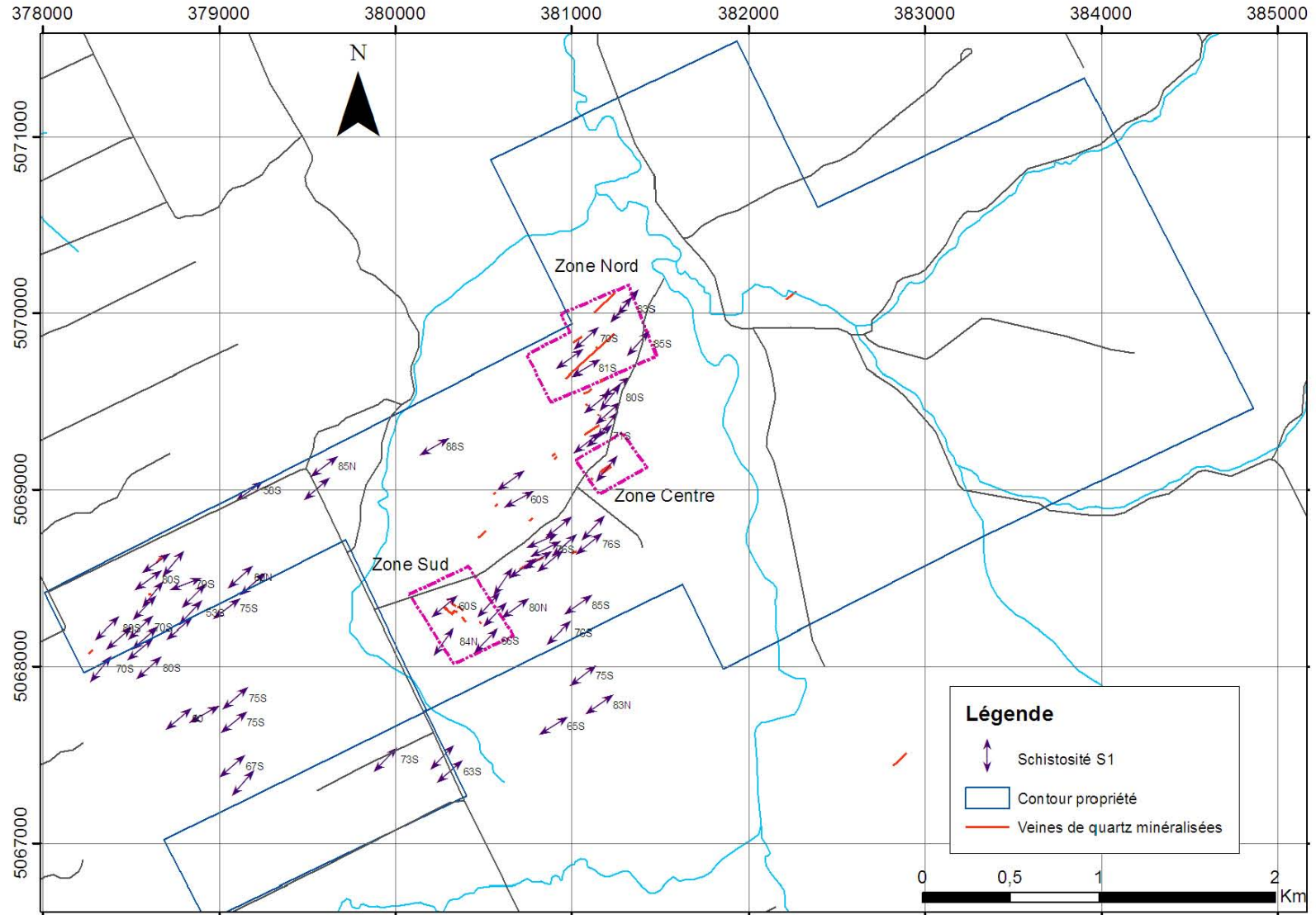


Figure 3.18 : Plans de schistosités mesurés sur les affleurements rocheux de la propriété St-Robert.

3.4 Altération

Depuis les années 1980, les géologues décrivent dans leurs rapports la présence d'une large auréole d'altération sur la propriété de St-Robert (Fig. 3.3). Cette altération est principalement de type séricitique (phyllique) et elle se surimpose et remplace partiellement ou totalement les assemblages potassiques et à chlorite-séricite. On retrouve une petite zone au nord de cette auréole présentant une altération de type potassique avec la présence de biotite et de hornblende (Cattalani, 1987).

À certains endroits de la propriété, une pyritisation intense est observée dans les roches sédimentaires formant de beaux cristaux automorphes et subautomorphes de pyrite allant de quelques millimètres à un centimètre de largeur (Fig. 3.3 et 3.19).

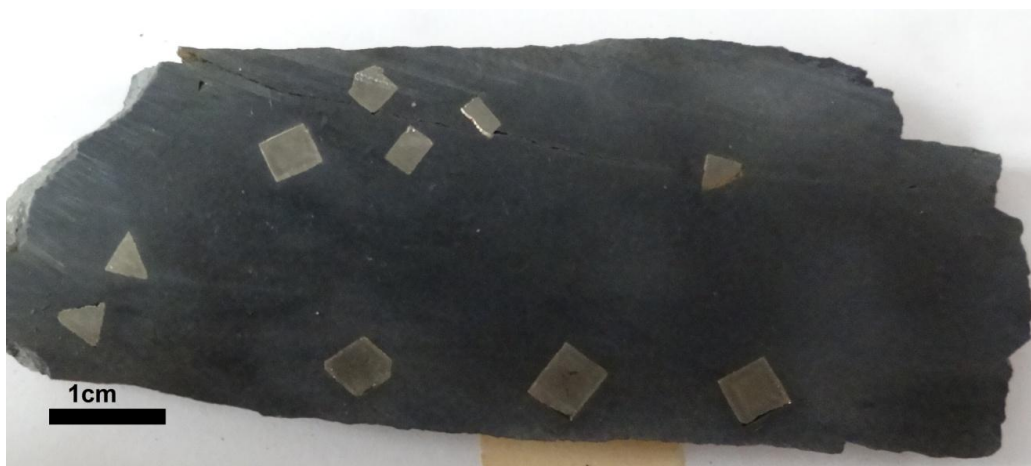


Figure 3.19 : Pyritisation intense d'un échantillon d'argilite provenant de l'extrémité nord-ouest de la propriété.

En plus de la géochimie effectuée sur les échantillons prélevés (chapitre 5), nous avons utilisé la spectroscopie de réflectance dans le visible et le proche infrarouge afin de caractériser les altérations présentes sur la propriété.

3.4.1 Spectrométrie de réflectance (visible et proche infrarouge)

La spectroscopie de réflectance identifie facilement et rapidement de nombreux minéraux d'altération. Dans le proche infrarouge, la spectroscopie nous permet de déterminer la présence de minéraux contenant du fer, du cuivre ou du manganèse tels que les pyroxènes ou amphiboles, ou encore la goethite et l'hématite.

Dans l'infrarouge de courte longueur d'onde, la spectroscopie nous permet de déterminer les minéraux contenant de l'eau, du CO₂ ou un groupement OH tels que les argiles (kaolinite, illite, ...) et les phyllosilicates (talc, chlorite, ...), les sulfates (alunite, jarosite, ...) et les carbonates.

L'utilisation du système spectrométrique ASD TerraSpec (spectrométrie en longueur d'onde de 320 à 2500 nm) sur la totalité de nos échantillons nous a permis de déterminer les principales phases minéralogiques argileuses présentes dans les roches de la propriété. Le logiciel TSG 7 nous a permis d'interpréter plus simplement les spectres obtenus (Fig. 3.20). Le tableau des résultats obtenus est présenté en annexe B1.

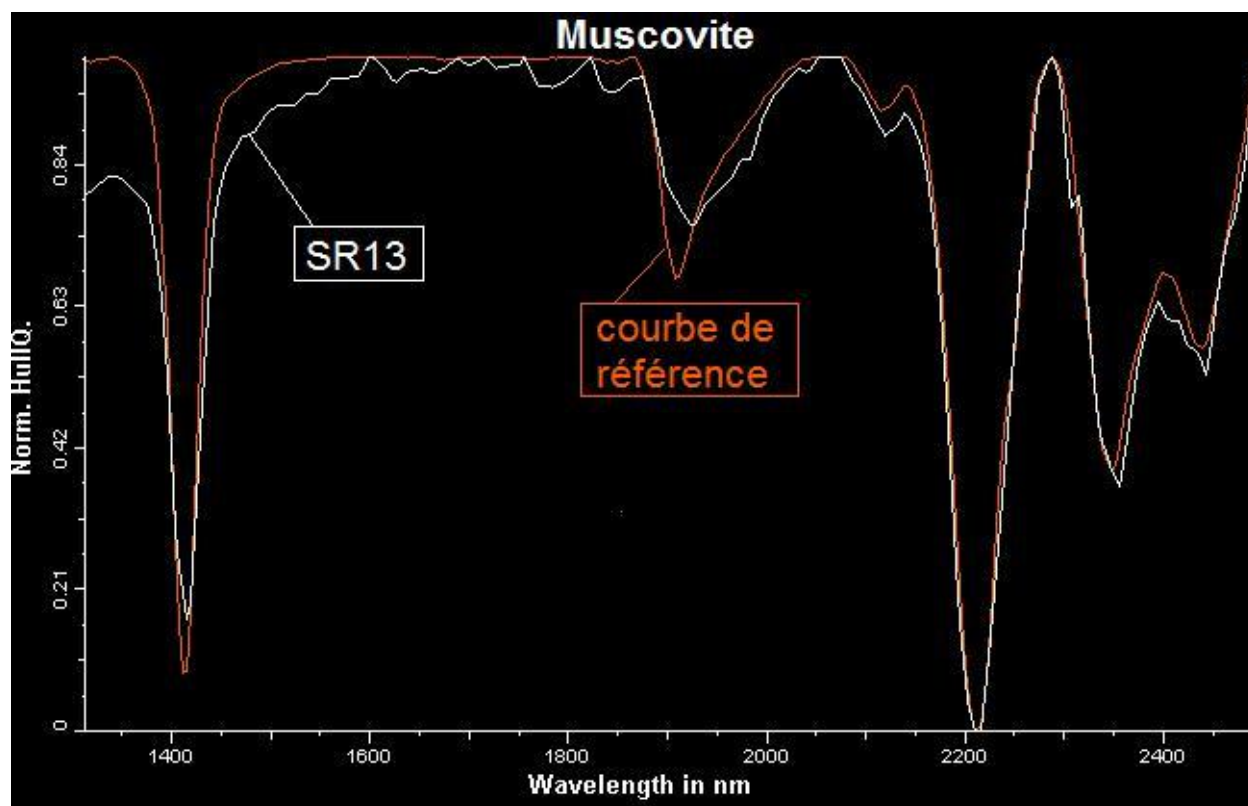


Figure 3.20 : Exemple d'un spectre visualisé à l'aide du logiciel TSG7 pour l'échantillon SR13 contenant de la muscovite.

Nous avons tout d'abord pu remarquer que les veines de quartz de la propriété de St-Robert ne sont majoritairement pas altérées ce qui se traduit par des spectres notés « aspectral » par le logiciel TSG7. Le logiciel a cependant noté la présence de goethite dans la plupart d'entre elles et lorsqu'elles sont altérées, les phases minérales sont la muscovite, la phengite, l'illite et plus rarement la palygorskite.

En plus du quartz et des feldspaths observés au microscope, le logiciel TSG 7 indique que les roches intrusives contiennent de la muscovite. La muscovite se retrouve dans les roches ignées et dans les roches métamorphiques de hautes températures tandis que la phengite se retrouve généralement dans des roches métamorphiques formées dans des pressions plus élevées et des températures moins élevées. L'illite se rencontre généralement dans des roches sédimentaires très peu métamorphisées, mais peut parfois avoir été soumise à un enfouissement relativement profond.

Les roches sédimentaires de la propriété contiennent, quant à elles, de la phengite ou de la muscovite, indiquant bien une altération de type phyllique. Malheureusement, aucun échantillon n'a été prélevé dans la zone d'altération potassique décrite par Cattalani (1987).

Le système EDS du microscope électronique à balayage (MEB) nous a permis d'observer la présence d'hématite, d'albite et de muscovite au sein des veines de quartz (annexe B2).

3.5 Minéralisations

Les minéralisations sur la propriété de St-Robert sont polymétalliques. Elles se retrouvent majoritairement dans les veines de quartz et les épontes des zones Centre, Sud et Nord, mais également dans certains dykes porphyriques et dans certaines fractures.

Par ordre d'abondance, les minéraux présents sur la propriété sont la pyrite (FeS_2), la galène bien souvent argentifère (PbS), la scheelite (CaWO_4), la cosalite ($\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$), la sphalérite (ZnS), la molybdénite (MoS_2) et la chalcopryrite (CuFeS_2).

La région de l'Estrie-Beauce est depuis longtemps reconnue pour son potentiel en or et l'intérêt de la propriété de St-Robert à longterm résidé dans l'or. Les sondages de St-Robert Metals réalisés dans les années 1950 ont recélé d'importantes teneurs en or, mais depuis, aucune valeur significative n'a été intersectée. Toutefois, comme discuté au chapitre 4, la présence d'or semble corroborée par la géochimie des sols et par les sédiments de ruisseaux.

On retrouve deux types de veines minéralisées au sein de la propriété : des veines subverticales et des veines subhorizontales plus tardives. Ces dernières sont beaucoup moins nombreuses et beaucoup moins larges ($< 10 \text{ cm}$) que les veines subverticales (Fig. 3.21). On les retrouve principalement dans la zone Centre où elles contiennent beaucoup de pyrite et de scheelite.

Elles ont principalement été observées dans les tunnels Lee et Lacombe et recoupent les veines subverticales dans toutes les zones de la propriété indiquant donc qu'elles se sont mises en place après les veines subverticales.



Figure 3.21 : À gauche : Veine subhorizontale, zone Sud. À droite : Veine de quartz minéralisée en galène argentifère, pyrite, sphalérite, scheelite et chalcopryrite de la zone Centre. Échantillon SR10 recelant 1280 ppm d'Ag et 2,5 % de W.

Les veines de quartz sont principalement constituées de quartz, et minoritairement de baryte, de chlorite, de calcite, de séricite et de kaolinite. On observe parfois des vacuoles de largeurs variables contenant des cristaux de quartz limpides et automorphes.

Cattalani (1987) a défini la paragenèse des veines de quartz minéralisées de St-Robert (Fig. 3.22).

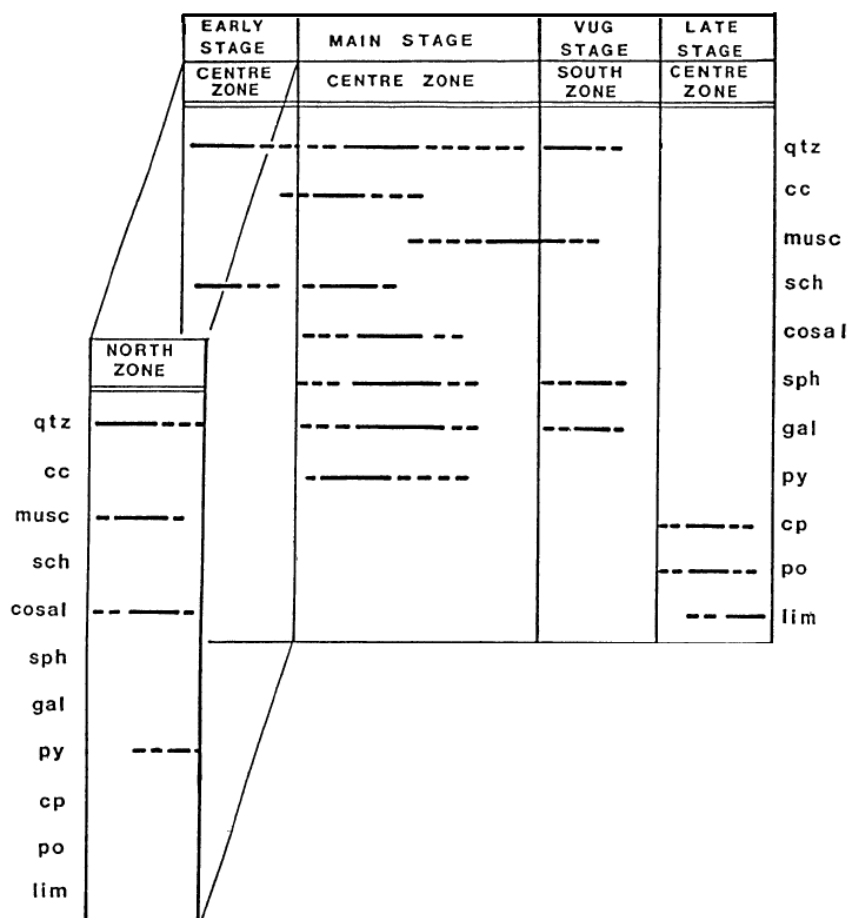


Figure 3.22 : Paragénèse minérale établie par Cattalani (1987). qtz : quartz, cc : calcite, musc : muscovite, sch : scheelite, cosal : cosalite, sph : sphalérite, gal : galène, py : pyrite, cp : chalcopyrite, po : pyrrhotite, lim : limonite.

Cattalani (1987) a également déterminé un $\delta^{34}\text{S}$ pour ces fluides d'environ 20 ‰ indiquant que la source du soufre dans les fluides hydrothermaux proviendrait des roches sédimentaires marines encaissantes. De plus, il propose que le tungstène provienne des strates sédimentaires riches en matière organique, et que l'argent, le bismuth et les autres métaux proviennent des unités calcaires non observées sur la propriété. Enfin, il attribua la zonation minérale aux variations locales du type de roche sédimentaire ou de leur orientation.

Cependant, nous pensons que la zonation minérale que l'on observe sur la propriété serait due à la zonation de température lors de la mise en place de l'intrusion à l'origine de la circulation des fluides. En effet, une zonalité des métaux est souvent remarquée dans ce type de gisement (Fig. 3.23). Par exemple, dans le cas de Cerro Rico de Potosi (Bolivie) qui est un porphyre d'étain-tungstène associé à de l'argent, le gisement est thermiquement et minéralogiquement zoné (Cunningham et al., 1996) avec un noyau de minéraux de haute température (cassitérite,

wolframite, bismuthinite et arsénopyrite (FeAsS)) entouré par un assemblage périphérique de minéraux de basse température (sphalérite, galène, minéraux d'argent (argentite, argent natif, tétraédrite, ...) et sulfosels de plomb). Entre ces deux assemblages, on retrouve des minéraux de températures intermédiaires comme la stannite et la chalcopryrite.

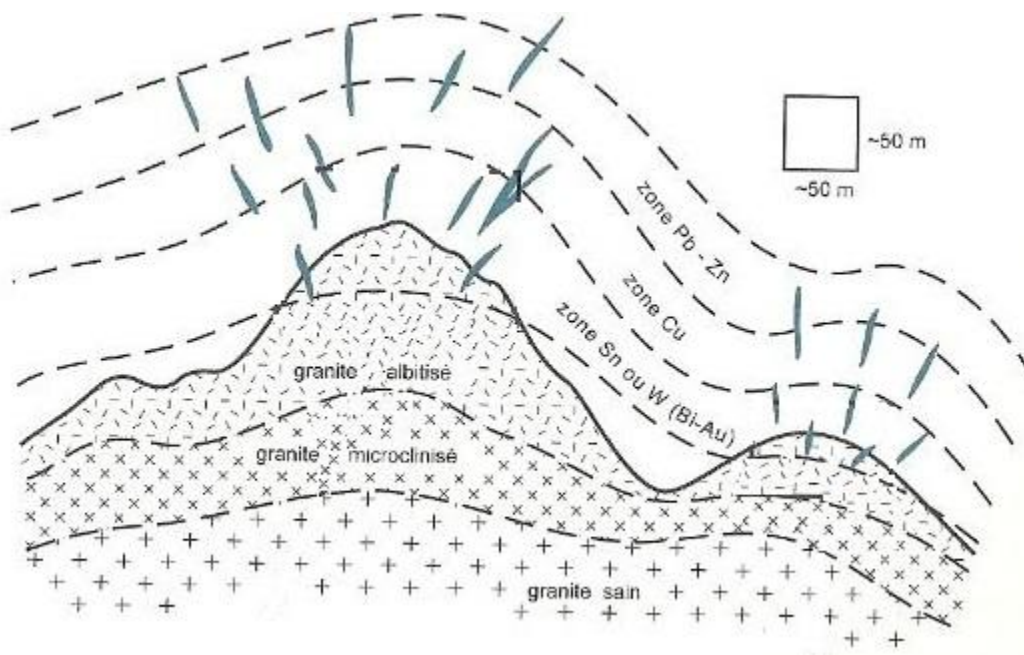


Figure 3.23 : Schéma décrivant la zonation chimique dans le cas des porphyres à Sn-W. Modifiée de Jébrak et Marcoux (2008).

Sur la propriété de St-Robert, la scheelite se retrouve principalement dans la zone Centre sous forme de cristaux de quelques centimètres de diamètre (Fig. 3.24), elle est facile à reconnaître de par sa fluorescence (Fig. 3.25). On retrouve également de la scheelite dans les zones Nord et Sud. La « découverte Lachance » de la zone Nord a montré des concentrations élevées en scheelite (jusqu'à 18,4 % WO_3) dans un dyke rhyolitique. De même, la construction du tunnel Lee en 1958 a été stoppée par la découverte d'un porphyre hautement minéralisé en scheelite (jusqu'à 0,6 % de W).

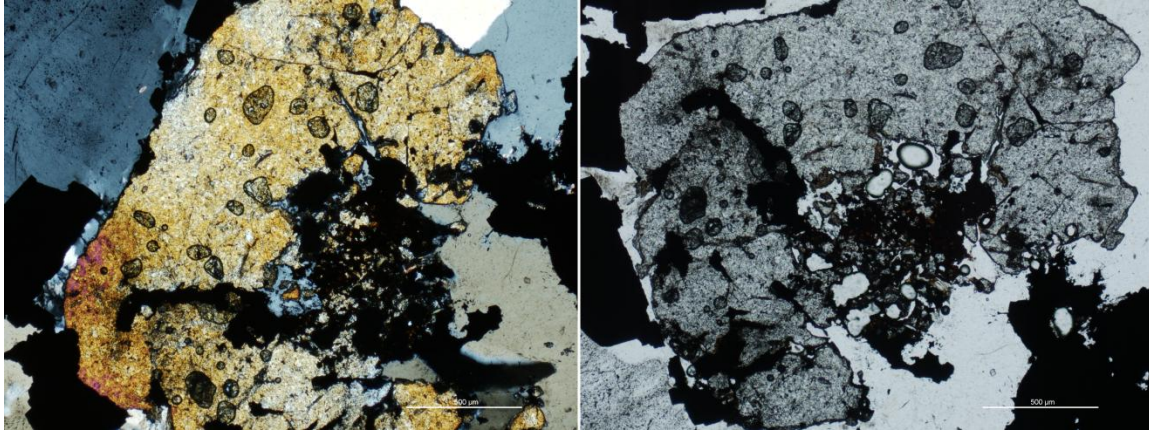


Figure 3.24 : Scheelite de l'échantillon SR10 en lumière transmise polarisée analysée (gauche) et en lumière polarisée non analysée (droite). La barre d'échelle correspond à 500 µm.

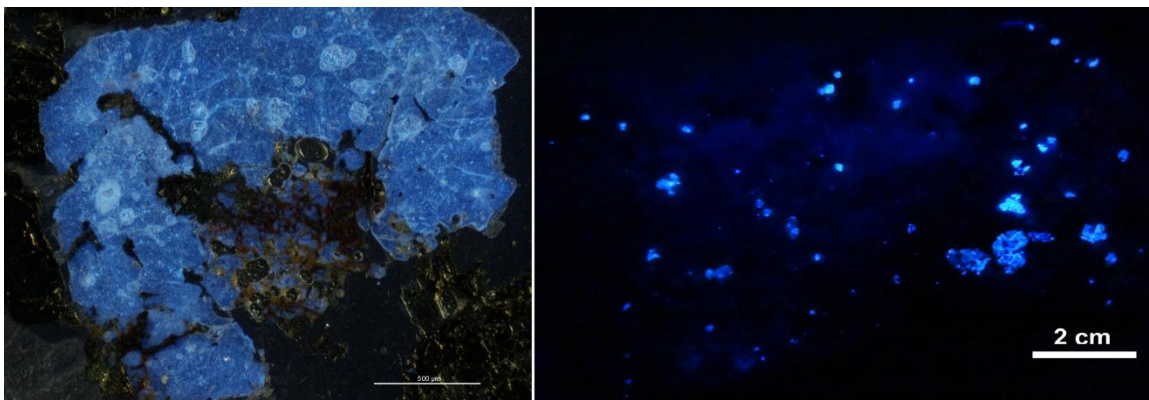


Figure 3.25 : À gauche : Scheelite de l'échantillon SR10 au microscope polarisant avec une lumière fluorescente. La barre d'échelle correspond à 500 µm. À droite : photographie d'une roche issue d'un dyke quartzo-feldspathique minéralisé.

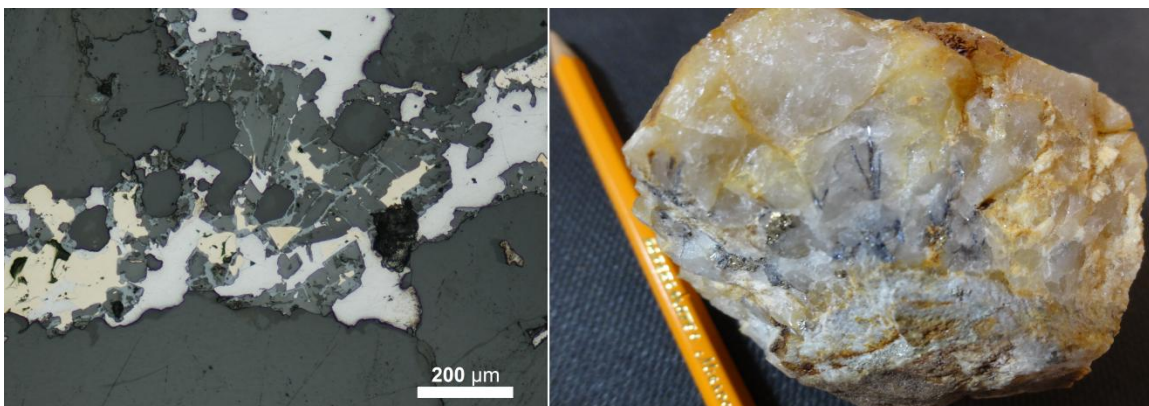


Figure 3.26 : À gauche : Échantillon SR09 de la zone Centre montrant de la cosalite, de la pyrite, de la galène et de la sphalérite. Lumière réfléchie. À droite : Veine de quartz de la zone Nord contenant de la cosalite et de la pyrite.

La cosalite se retrouve principalement dans la zone Nord. Les cristaux de cosalite peuvent parfois atteindre jusqu'à 10 centimètres de long (Fig. 3.26).

La sphalérite est présente dans toutes les zones, tout comme la pyrite et la galène argentifère. Elle se fait généralement remplacer par la pyrite, phénomène souvent appelé « *sphalerite disease* » (Fig. 3.27).

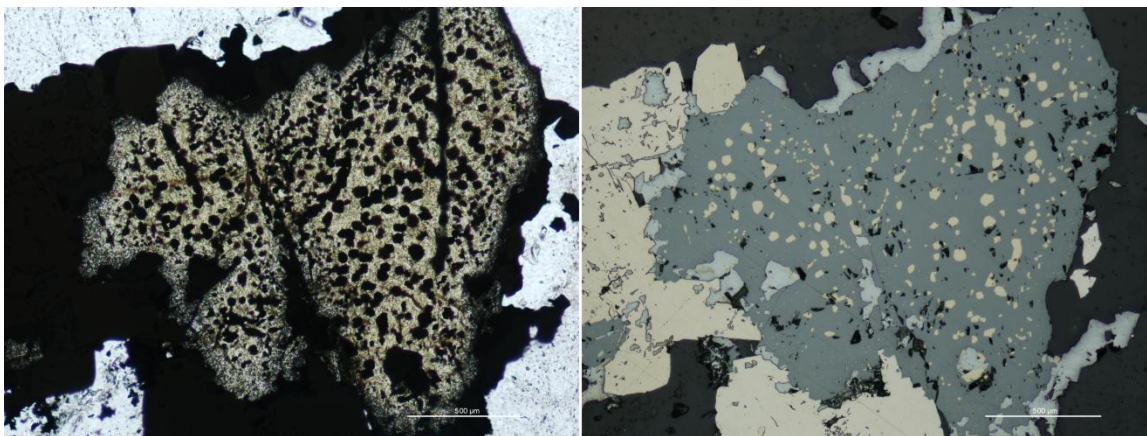


Figure 3.27 : Photographie montrant une déstabilisation de la sphalérite (*sphalerite disease*) : remplacement de la sphalérite par de la chalcopyrite. Échantillon SR10. Lumière transmise polarisée non analysée (gauche), lumière réfléchie (droite). La barre d'échelle correspond à 500 μm .

Certains échantillons minéralisés ont été analysés à l'aide du système EDS du microscope électronique à balayage de l'INRS afin de déterminer la composition des minéraux métalliques. Les résultats des analyses avec le système EDS sont présentés en annexe B2.

Nous avons pu remarquer que la cosalite présente dans la zone Nord contenait de bonnes concentrations en argent, ce qui n'avait jamais vraiment été déterminé. Nous avons même pu noter la présence d'une phase minérale exempte de plomb, contenant du soufre et du bismuth avec des traces d'argent correspondant probablement à de la bismuthinite (Bi_2S_3).

Globalement, la cosalite présente dans les échantillons (zones Centre et Nord) contenait de l'argent (environ 3 % poids), du tellure (jusqu'à 11 % poids), et parfois de l'antimoine. La galène présente également parfois ces éléments. Nous avons pu noter la présence de platine dans la molybdénite (environ 2,5 % poids). Enfin nous avons pu déterminer la présence de wulfénite (PbMoO_4).

De la fluoro-apatite automorphe a également été observée.

3.6 Implications métallogéniques

De nombreuses veines de quartz sont observées dans la région de St-Robert (ex. : mine de Baskatong, St-Ludger : mine de quartz), cependant, seules les veines de quartz de la propriété de St-Robert sont minéralisées. Bien que d'après Cattalani (1987), les fluides minéralisateurs avaient probablement pour origine les eaux météoriques, il est probable que l'intrusif de St-Robert est joué un rôle majeur dans la mise en place de la minéralisation. Nous observons d'ailleurs ce rôle dans la zonation minéralogique présente au sein de la propriété avec, les zones Centre et Nord, proche de l'intrusion, minéralisées en minéraux de moyennes et hautes températures (cosalite, scheelite) et la zone Sud, plus distale, minéralisée en minéraux de basses températures (galène, sphalérite). Cette zonation minéralogique est typique des gisements porphyriques à étain et tungstène (Fig. 3.23; Jébrak et Marcoux, 2008). Bien que l'étain ne soit pas observé, le tungstène est présent en quantité significative au sein de la propriété. Dans ce type de gisement, les minéralisations en stockwerks et en filons prédominent, de ce fait, dans la littérature, ce type de gîte est bien souvent appelé « gîtes filoniens d'étain et de tungstène » (Sinclair, 1996). Dans les Appalaches du Canada, ce type de gîte apparaît pendant et après l'orogénèse acadienne, au Dévonien principalement, et est associé à des plutons calco-alcalins (comme celui de Saint-Sébastien-Sainte-Cécile) ayant pour origine la fusion partielle du socle de Grenville sous-jacent, causée par l'épaississement crustale dû à l'orogénèse acadienne (Gauthier et al, 1994). Au Nouveau-Brunswick, on retrouve plusieurs gîtes porphyriques à tungstène associés à des intrusions dévoniennes (ex. : gîtes de Burnt Hill, Mont Pleasant et Sission Brook). Le gisement du Burnt Hill est un exemple de gisement porphyrique à tungstène. La minéralisation dans le gisement de Burnt Hill est présente dans des stockwerks, des fractures et dans des veines de quartz riches en chlorite et est reliée à un pluton dévonien. Les veines de quartz minéralisées sont subverticales et varient de quelques centimètres à plusieurs mètres (Stewart et al., 2011). Tout comme dans le gîte de St-Robert, ce type de gîte est caractérisé par une altération à muscovite (ou séricite) – chlorite.

Ce type de gisement n'est pas incompatible avec la présence d'or, mais il se pourrait également que les minéralisations en or ne soient pas reliées à l'intrusion, mais aux grandes failles régionales. En effet, dans la région de St-Robert, de nombreuses occurrences d'or orogénique ont été observées (ex. : gîte de Boil Mountain, Maine, chapitre 2).

CHAPITRE 4 : GEOCHIMIE DES SOLS

Au début des années 1980, des levés de géochimie des sols ont été effectués pour la compagnie Les MINES J.A.G. Ltée. Au total, 584 échantillons de sols ont été prélevés couvrant environ 20 kilomètres de ligne sur la propriété St-Robert.

Le but premier de ces levés était de pallier à l'absence d'informations sur la zone Centre là où les levés géophysiques n'ont pu pénétrer l'épaisse couche de mort-terrain. Comme cette méthode a montré de bons résultats lors du premier levé, ils décidèrent d'étendre le levé sur d'autres secteurs de la propriété.

À partir des cartes d'archives fournies par la compagnie Les Mines J.A.G. Ltée, nous avons répertorié ces données sur un tableur Excel, puis à l'aide du logiciel ArcGIS, nous avons pu géoréférencer chaque station afin d'obtenir leurs coordonnées UTM (NAD 83) pour pouvoir finalement réaliser des cartes d'abondances d'éléments dans les sols.

4.1 Généralités sur les sols de la région

4.1.1 Conditions climatiques de la région

Les sols de la région de Beauce Sud se sont développés dans une région sujette à un climat continental tempéré à hivers froids et étés chauds (Peel et al., 2007). Selon la classification de Köppen-Geiger, ce climat serait de type Dfb (Fig. 4.1). Dans ce contexte climatique, les fortes précipitations annuelles et les propriétés de drainage des sols ont favorisé la formation de sols podzoliques.

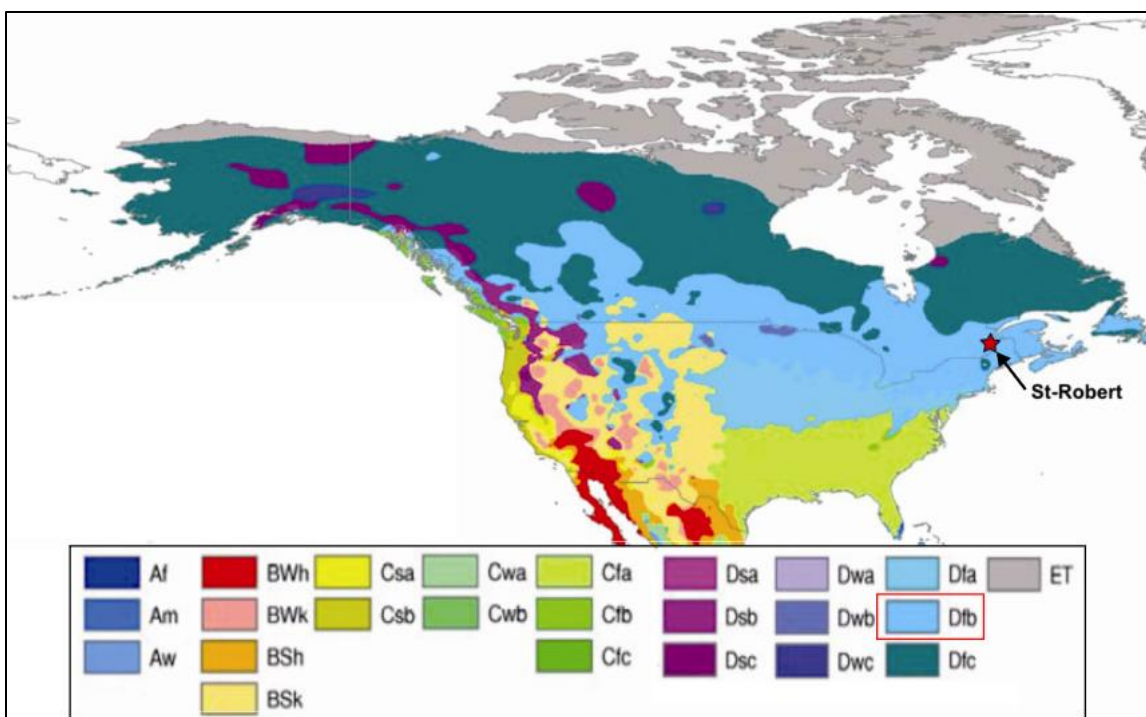


Figure 4.1 : Carte de distribution des domaines climatiques pour l'Amérique du Nord, selon la classification de Köppen-Geiser. Modifiée de Peel et al. (2007). La propriété de St-Robert se situerait donc dans un climat de type Dfb correspondant à un climat tempéré, présentant des hivers froids et des étés chauds avec de fortes précipitations annuelles : à la station St-Odilon en Beauce (358 m d'altitude) : 1197 mm de précipitation annuelle totale moyenne (eau + neige) pour une température moyenne de 3,1 °C (source : www.stat.gouv.qc.ca).

4.1.2 Dépôts de surface

La région de la Beauce a subi trois avancées glaciaires importantes, dont la plus récente date de plus de 12 000 ans. Ces glaciations quaternaires ont créé un vaste manteau de tills d'épaisseurs variables (de quelques centimètres à plusieurs mètres). En superficie, dans la région de la Beauce, les tills wisconsinien constituent près de 80 % des dépôts de surface (Ouellet et al., 1995).

Les sols de la propriété St-Robert se sont principalement développés sur un placage de till et localement sur une nappe de till (Fig. 4.2). Dans le faciès de placage, l'épaisseur du till est faible et le roc est sub-affleurant. Dans un tel contexte, la dispersion glaciaire devrait être faible, ce qui peut justifier l'utilisation de la méthode de prospection pédogéochimique.

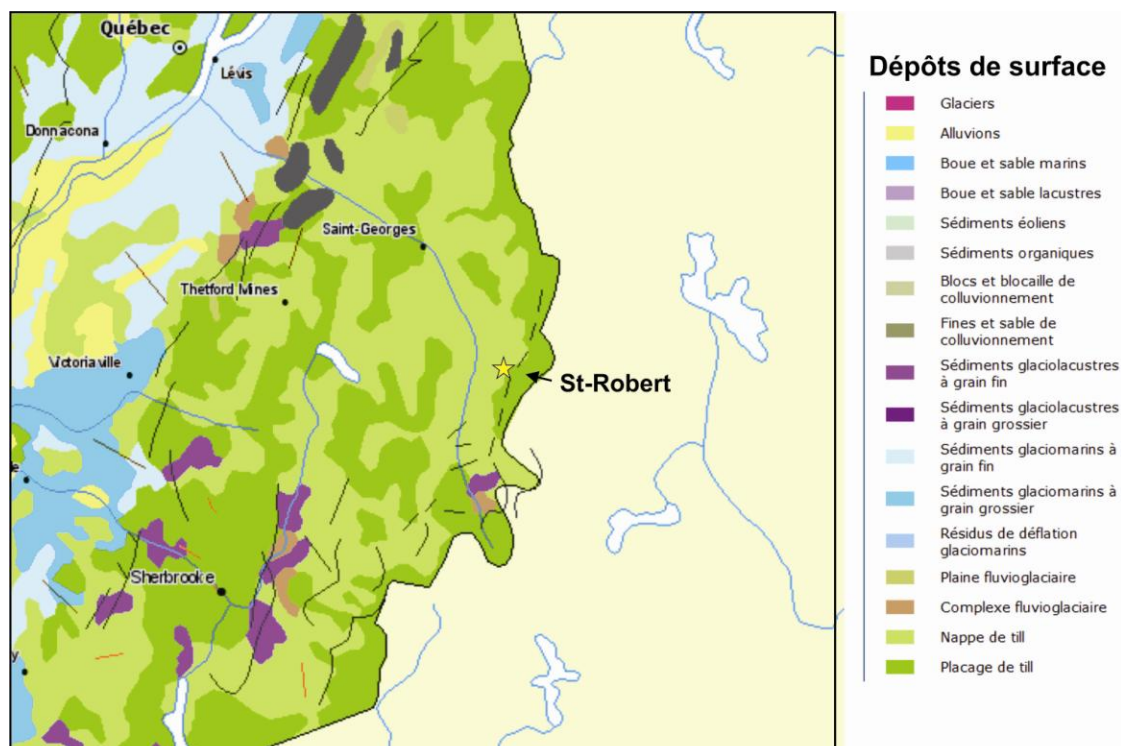


Figure 4.2 : Carte des dépôts de surface de la Beauce et d'une partie de la région de Québec. Carte modifiée de l'Atlas du Canada. <http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/index.html> (consulté le 14 juin 2012).

4.1.3 Contexte pédologique de la région

Comme expliqué plus haut, dans cette partie du Québec, les sols podzoliques prédominent. Ces derniers sont aussi les sols caractéristiques du secteur de St-Robert-Bellarmin comme l'indique la figure 4.4. La formation de ces sols est favorisée par un climat tempéré, de fortes précipitations et un bon drainage des sols. Dans ces conditions, les réactions d'intempérisme chimique (weathering) sont importantes.

Les sols podzoliques de la région sont composés de différents horizons (Fig. 4.3) plus ou moins riches en matière organique et en éléments minéraux. Ces horizons se superposent comme ceci :

- Un **horizon O** ou « humus » correspondant en une couche de débris végétaux.
- Un **horizon A** contenant de la matière organique et de la matière minérale. On peut le subdiviser en trois sous-horizons : A1, A2 et A3 indiquant graduellement la diminution de la concentration en matière organique et donc son influence sur la composition de ces horizons. En effet, la composition de l'horizon A3 n'est quasiment pas influencée par la

matière organique contrairement à l'horizon A1. Le contexte acide des sols podzoliques, qui se développe normalement sous des forêts de conifères, favorise la dissolution de la matière organique et des minéraux solubles (Fe et Al). Par drainage, ces métaux sont lessivés de l'horizon A et accumulés dans l'horizon B. La base de l'horizon A (A3) est souvent de couleur grise et d'aspect cendré. Cet horizon fortement lessivé facilite l'identification sur le terrain des podzols.

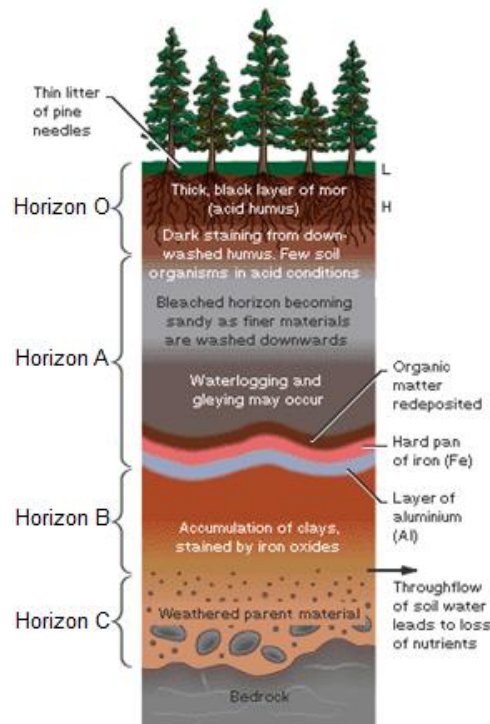


Figure 4.3 : Schéma du processus de formation d'un podzol. Modifiée de Denis Cousineau [Image en ligne]. <http://deniscousineau.pbworks.com/w/page/17467599/Revue%20visuelle> (consulté le 14 juin 2012).

- Un **horizon B** défini comme l'horizon « d'accumulation » contenant très peu de matière organique. Les conditions relativement oxydantes dans cet horizon permettent la précipitation des oxydes et hydroxydes de fer d'où la coloration rougeâtre de l'horizon B. En plus de la matrice minérale silicatée, les éléments caractéristiques de cet horizon sont fins ou amorphes (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium). Plusieurs de ces oxydes amorphes ont une forte capacité de fixation des métaux.
- Un **horizon C** correspondant à la zone d'altération de la roche mère sous-jacente ou des dépôts quaternaires. Les processus pédogéniques ont peu d'influences sur cet horizon.

Notez que les processus physico-chimiques impliqués dans la formation des podzols peuvent jouer un rôle dans la distribution des métaux traces dans les sols (Courchesne et Hendershot, 1997).

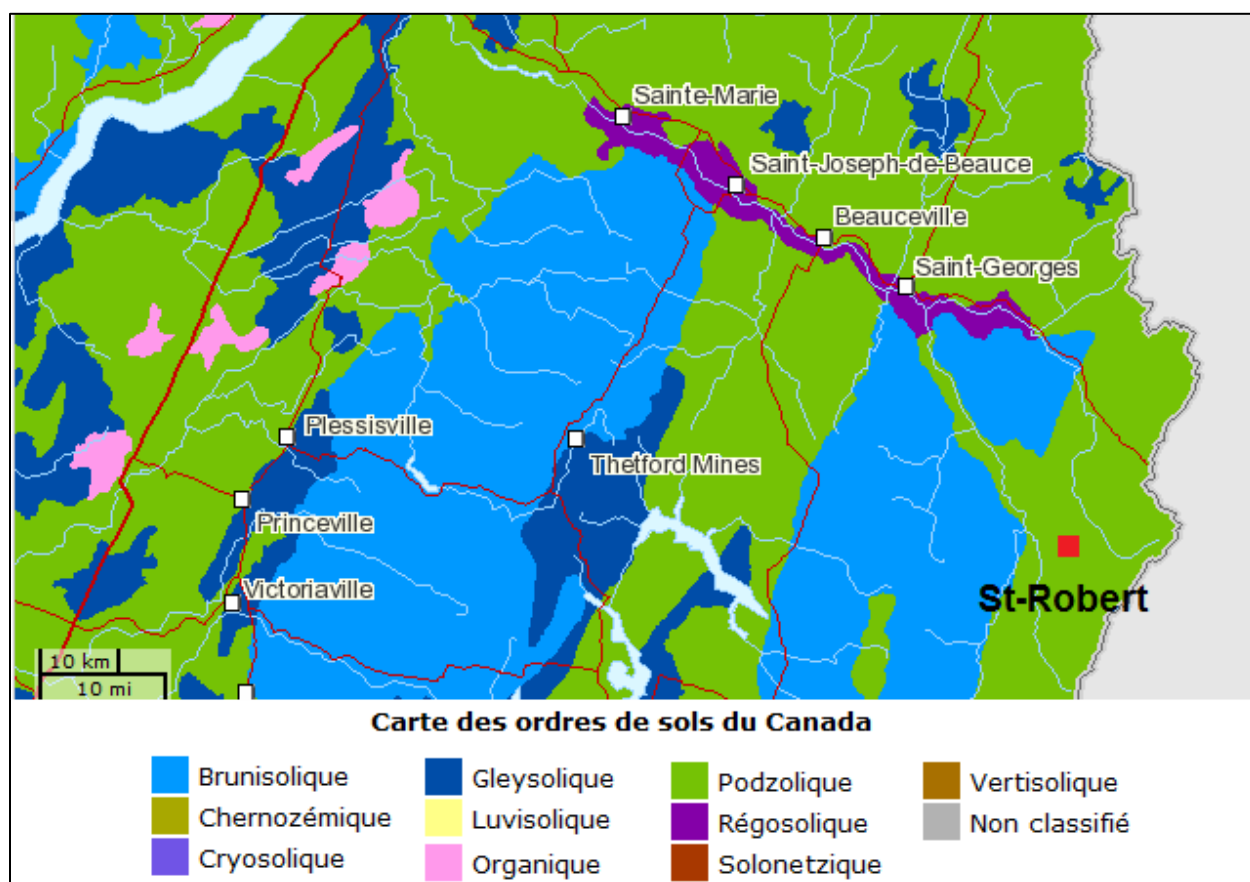


Figure 4.4 : Carte de classification des ordres de sols de la région de la Beauce. Carte modifiée du site WEB d'Agriculture Canada. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/webmaps.html> (consulté le 14 juin 2012).

4.2 Traitement des données

4.2.1 Échantillonnage

Ces travaux se sont répartis sur trois périodes (1982, 1983 et 1984). Pour toutes les périodes, l'échantillonnage s'est fait à tous les 100 pieds (30,48 mètres) sur des lignes espacées de 400 pieds (122 mètres) les unes des autres (Fig. 4.5) et orientées NO-SE et donc perpendiculairement au grain tectonique appalachien. Lors des levés pédogéochimiques sur la propriété de St-Robert, plusieurs horizons ont été échantillonnés (Fig. 4.5) :

1. En automne 1982, les 145 échantillons de sols ont été prélevés dans l'horizon B.
2. En été 1983, 313 échantillons ont été prélevés dans l'horizon A1.
3. Enfin, à l'automne 1984, 126 échantillons ont été ramassés dans l'horizon A3.

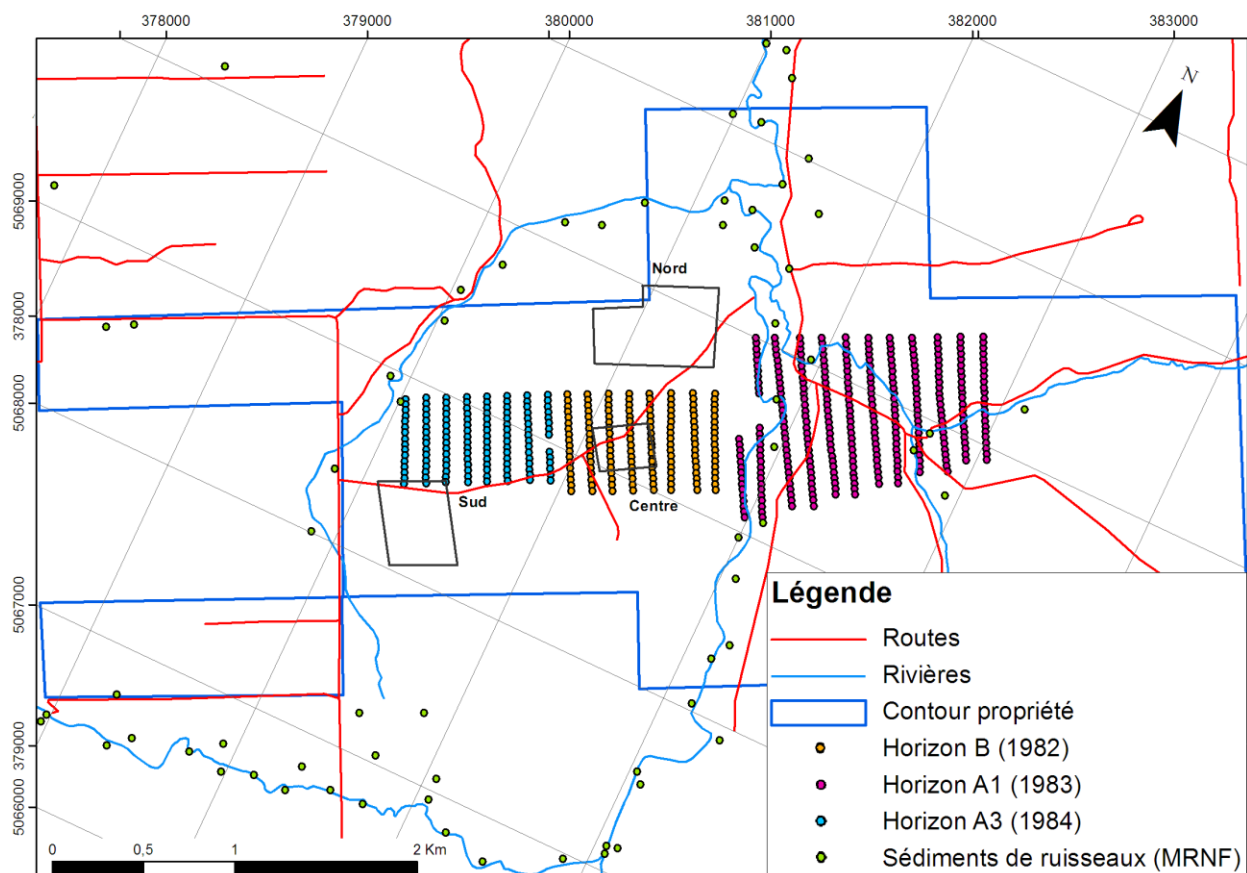


Figure 4.5 : Carte de localisation de l'échantillonnage des sols réalisé sur trois différents horizons: à l'ouest l'horizon A3, au centre l'horizon B et à l'est l'horizon A1 (propriété St-Robert).

Pour l'étude des résultats, il faut tout d'abord répondre à quelques interrogations :

- 1- Est-ce que le fait que les trois séries de données ont été prélevées dans des horizons différents change quelque chose dans l'interprétation?
- 2- Les concentrations en métaux sont-elles plus élevées pour les sols prélevés dans l'horizon B?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de faire appel à une étude statistique.

4.2.2 Traitement statistique préliminaire

À l'aide d'un simple graphique des concentrations moyennes pour chaque élément analysé sur les différents horizons (Fig. 4.6), nous pouvons observer qu'il y a bien une tendance dans nos données : globalement, les zones A3 et B semblent être enrichies par rapport à la zone A1.

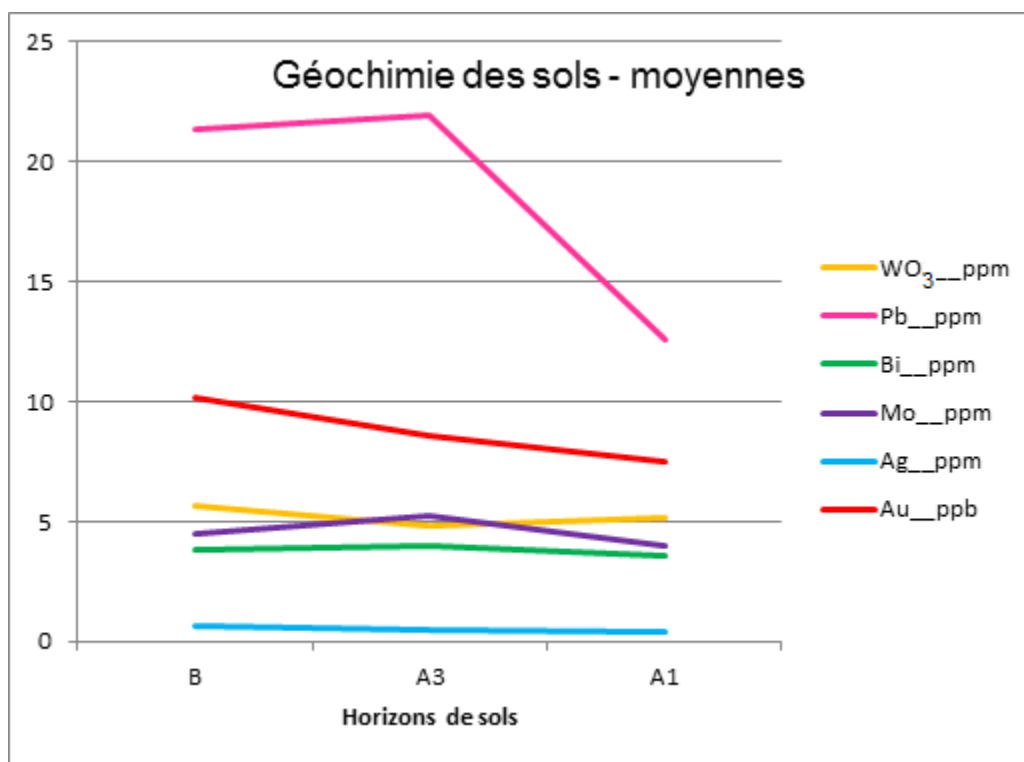


Figure 4.6 : Graphique représentant les moyennes des concentrations pour chaque élément en fonction des horizons de sol B, A3 et A1.

Deux hypothèses peuvent être émises :

1. Cette tendance peut être expliquée par le fait que les échantillons de sols prélevés dans la zone A1 se situent à l'est de la rivière du Loup, où l'on n'a, pour le moment, découvert aucun corps minéralisé. De même, les échantillons de l'horizon B et A3 ont été prélevés dans les zones Centre et Sud respectivement qui sont des secteurs présentant des minéralisations polymétalliques importantes.
2. Les plus fortes concentrations dans les horizons de sols A3 et B peuvent être dues au fait que ces horizons se situent plus proche du socle rocheux et donc de la source de la minéralisation.

Dans le but d'effectuer une analyse judicieuse des variations des différents éléments dans les sols de nos trois séries de données, nous devons tout d'abord procéder à un ajustement des données. Il est en effet nécessaire de travailler en mode relatif étant donné que nous ne connaissons pas l'action des différents horizons de sols sur les concentrations des différents éléments chimiques. Pour ce faire, nous devons d'abord déterminer le bruit de fond géochimique pour les différents éléments et horizons de sols. Deux méthodes classiques peuvent être utilisées :

- méthode du changement de pente dans la fréquence cumulée (Fig. 4.7);
- méthode de Tukey (1977).

La première méthode consiste en une simple lecture graphique : sur un graphique représentant la fréquence cumulée en fonction de la concentration en différents métaux, le premier changement de pente caractérise la valeur maximum du bruit de fond. En général, cette valeur regroupe la partie dominante de la population échantillonnée. Les autres étant les échantillons à teneurs anormales qui nous intéressent. La figure 4.7 représente la fréquence cumulée pour le plomb dans l'horizon B. Ici, la limite du bruit de fond est d'environ 18 ppm. Les résultats complets pour les autres éléments et horizons sont présentés en annexe C1.

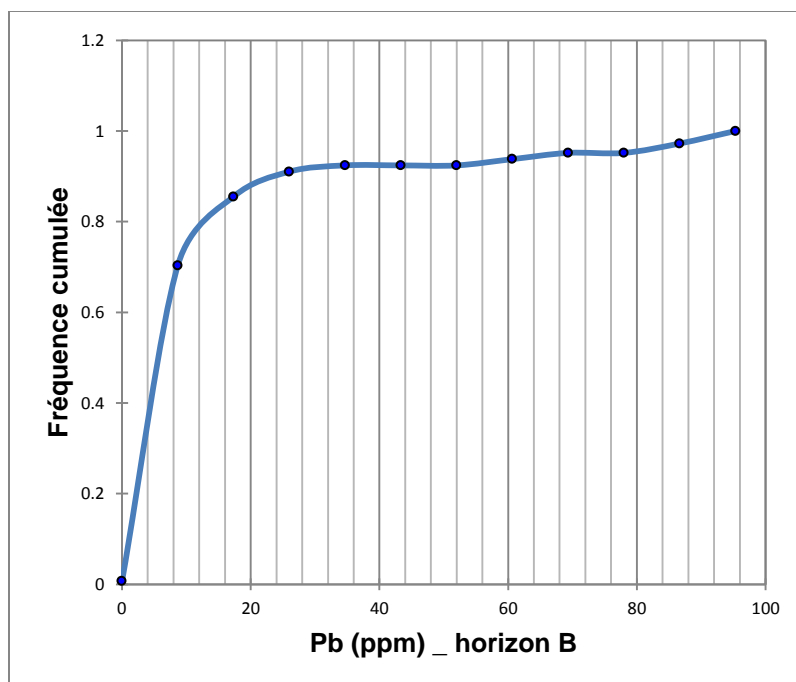


Figure 4.7 : Graphique de la fréquence cumulée pour le plomb dans l'horizon de sol B.

Cette méthode peut être difficile à interpréter dans le cas où le graphique des fréquences cumulées montre plusieurs changements de pente, ou un changement de pente peu précis.

La seconde méthode nommée « méthode de Tukey » (1977) est une méthode statistique pour déterminer les valeurs anormales par rapport à une certaine population et uniquement par rapport à la structure de cette population. Elle a l'avantage de ne pas reposer sur des hypothèses de normalité qui ne sont pas toujours vérifiées en pédogéochimie d'exploration. Tukey (1977) a introduit le terme de vibrisse supérieure (upper whisker) qui se définit par la formule suivante :

$$Tu = Q3 + 1.5 \times (Q3 - Q1)$$

Avec Q1 et Q3 les 1^{er} et 3^{ème} quartiles représentant respectivement 25 et 75 % des valeurs géochimiques mesurées. Toutes les valeurs supérieures à celle de la vibrisse supérieure sont considérées statistiquement comme « anormales » par rapport à la population de données et à sa structure. Le tableau suivant récapitule les valeurs de bruit de fond en fonction des différents éléments chimiques obtenues avec les méthodes des fréquences cumulées et de Tukey (Tab. 4.1).

Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des valeurs de bruit de fond obtenues par la méthode de Tukey (1977) et par la méthode de la fréquence cumulée des différents éléments pour les horizons de sol A1, A3 et B.

Au (ppb)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)	Ag (ppm)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)
A1	5.5	8	A1	0.27	0.65
A3	7	12	A3	0.59	0.65
B	30	12.5	B	0.62	1

Pb (ppm)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)	WO₃ (ppm)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)
A1	15	20	A1	7	9.5
A3	13	38.5	A3	5.75	9.75
B	18	27.375	B	13	12

Bi (ppm)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)	Mo (ppm)	Fréq. Cum.	Tukey (1977)
A1	3	5.5	A1	8	9.5
A3	2.8	4	A3	7.75	14.5
B	2.75	5.5	B	2.5	13.5

Compte tenu de la meilleure précision obtenue avec la méthode de Tukey, c'est cette méthode que nous allons choisir pour calculer les concentrations normalisées des éléments. Cependant, nous pouvons observer que dans les cas où la courbe de la fréquence cumulée montre un net changement, les deux valeurs obtenues ne sont pas si éloignées. Dans l'ensemble, les valeurs de bruit de fond calculées par la méthode de Tukey (1977) sont légèrement plus élevées que celles obtenues à partir des fréquences cumulées (Tab. 4.1).

Le graphique des moyennes des concentrations relatives pour chaque élément analysé pour les différents horizons est présenté à la figure 4.8. On observe cette fois-ci qu'une forte atténuation se démarque.

Cependant, nous pouvons noter quelques points :

- la moyenne des concentrations relatives en or est plus élevée pour l'horizon B. Ceci peut-être expliqué en regardant la carte des abondances de l'or (Fig. 4.11); en effet, une importante zone enrichie en or correspond à la zone Centre se distinguant dans la zone de prélèvement de l'horizon B;
- l'horizon A3 est plus enrichi en bismuth que les autres horizons. Ce point sera étudié plus en détail dans la partie suivante.

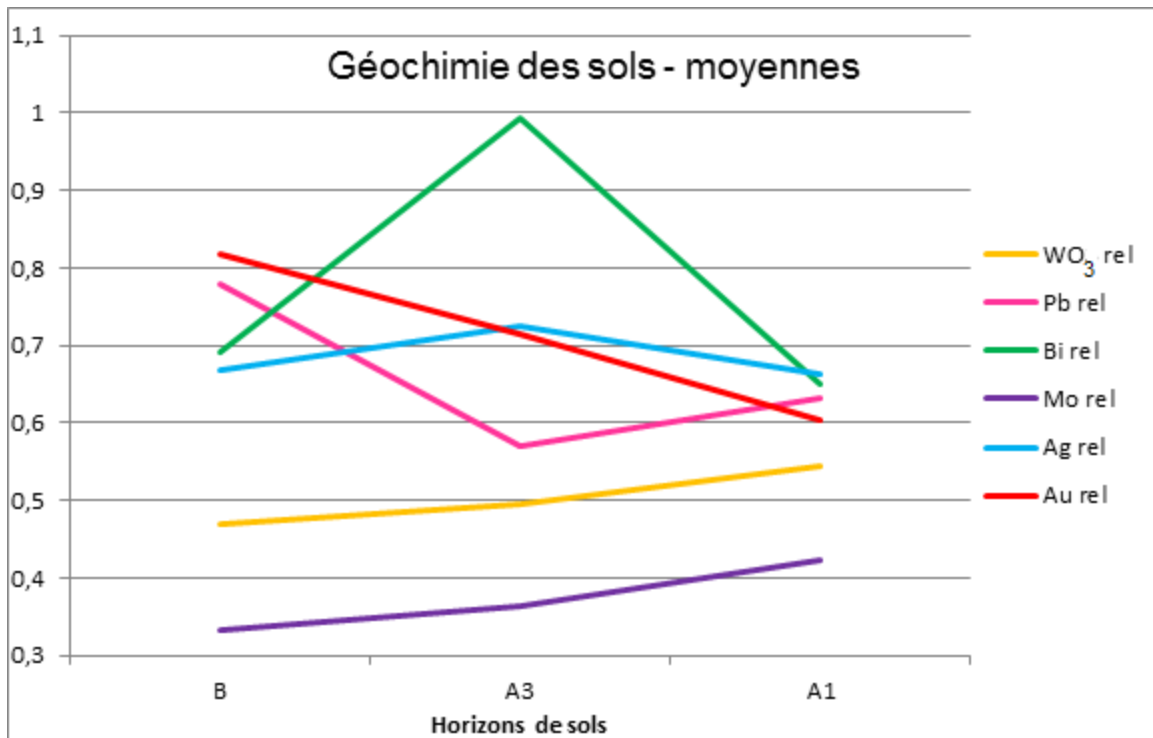


Figure 4.8 : Graphique représentant les moyennes des concentrations relatives de chaque élément en fonction des horizons de sol B, A3 et A1.

4.3 Représentation spatiale des données

Les concentrations pour chaque élément ont donc été divisées par la valeur de la vibrisse supérieure de l'élément correspondant afin d'obtenir des données relatives pour une comparaison plus juste de l'ensemble des données.

Les cartes complètes obtenues pour chaque élément avant et après correction du bruit de fond sont présentées en annexe C2 et sont issues de l'interpolation des données par krigeage. Le krigeage des données a été réalisé à l'aide du programme « Kriging » du logiciel ArcGIS (version 9.3.1).

Pour aider à l'interprétation, le tracé des failles a été représenté sur les figures suivantes. Ces tracés sont issus de l'interprétation des anisotropies magnétique et sismique détaillée dans le chapitre 6. De même, les analyses géochimiques des sédiments de ruisseaux issus du MNRF et les forages sont également représentés.

4.3.1 Résultats

Dans les cartes présentées en annexe C2, nous pouvons constater que le passage en mode de concentrations relatives a tout de même entraîné quelques modifications significatives. Ce changement est surtout important pour ce qui est de l'atténuation des discontinuités latérales entre les trois zones échantillonnées.

Par exemple, la distribution des concentrations en **plomb** (normalisées au bruit de fond) montre un vaste domaine de faibles valeurs relativement uniforme à l'est de la rivière du Loup. Ce domaine se prolonge sur 750 mètres à l'ouest de la rivière.

Un domaine hautement anomalique se démarque entre le tracé des failles « magnétique » et « sismique » orientées N50° entre les lignes 4.5 et 3 (Fig. 4.9). Cette zone est centrée sur le tracé d'une des failles « magnétiques » orientées N150 à l'ouest de la zone Centre. La zone anomalique se prolonge vraisemblablement vers la zone Sud et est recoupée par les forages J84-08, J84-07, J83-22 et J83-21.

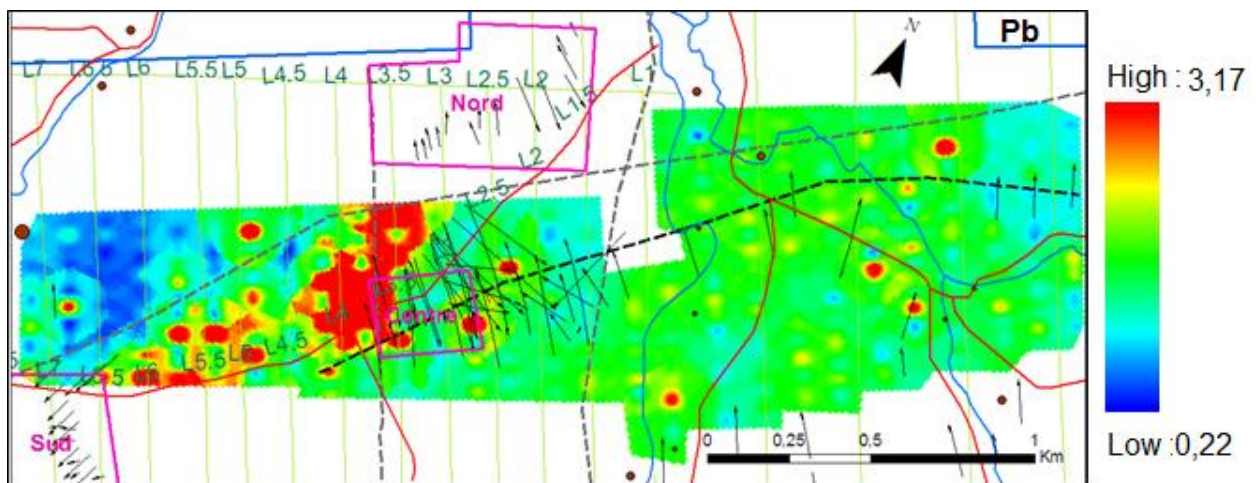


Figure 4.9 : Carte d'abondance relative du Pb dans le sol. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracé des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

La distribution des concentrations relatives en argent montre plusieurs similitudes avec celle du plomb. Toutefois, de petites zones anomaliques observées à l'extrémité ouest du levé ne sont pas associées à des zones enrichies en Pb (Fig. 4.10) :

- une large zone coïncidant avec la zone riche en plomb et située au niveau de l'intersection de la faille « sismique » N50° et de la faille « magnétique » N150°; la zone occupe une surface d'environ 400 mètres de long sur 300 mètres de large;
- une zone d'environ 300 mètres située au nord de la zone Sud recoupée par le forage J13;
- une zone diffuse étendue sur environ 500 mètres à l'est de la rivière du Loup, interceptée par les forages J84-15 et J5.

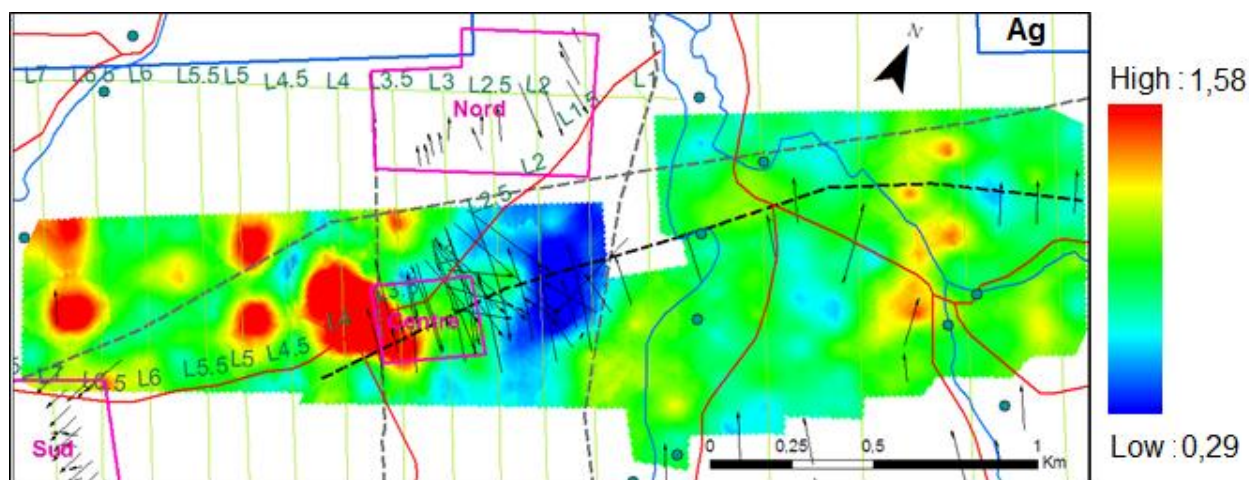


Figure 4.10 : Carte d'abondance relative de l'Ag dans le sol. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracé des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

Dans l'ensemble, l'or présente une distribution spatiale distincte de celle du plomb et de l'argent. L'or est surtout concentré sur une grande zone correspondant à la partie est de la zone Centre (L3.5 – 2.5) d'une superficie de 900 mètres carrés. Beaucoup de forages ont été effectués dans cette zone : N1, R2, R5, R6, R12, R13, J1, J2, J83-09, J83-10, J83-11, J84-09, J84-10 et J84-11 (Fig. 4.11). Les forages des années 50 rapportèrent de fortes concentrations en or.

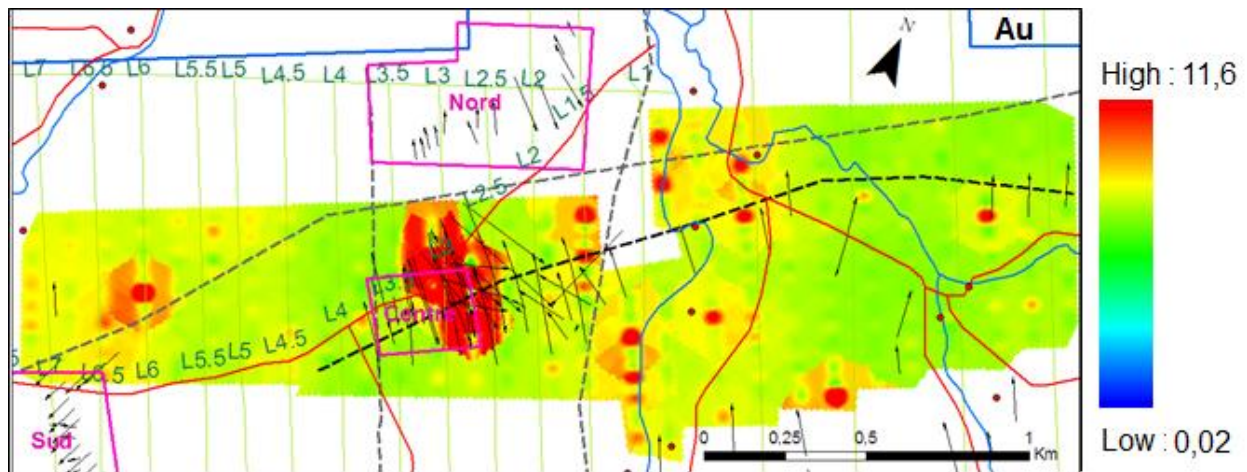


Figure 4.11 : Carte d'abondance relative de l'Au dans le sol. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracés des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

Contrairement aux éléments Pb, Ag et Au, le bismuth montre une distribution en domaine suggérant un effet pédogénique supérieur à la contribution pouvant provenir des zones minéralisées.

Ainsi, pour le **bismuth**, la figure 4.12 indique que l'horizon A3 échantillonné dans la partie ouest de la propriété est enrichi par rapport aux deux autres horizons. Nous pouvons donc en conclure que la méthode de Tukey n'est certainement pas suffisante pour normaliser les données provenant de l'échantillonnage de l'horizon A3 pour cet élément.

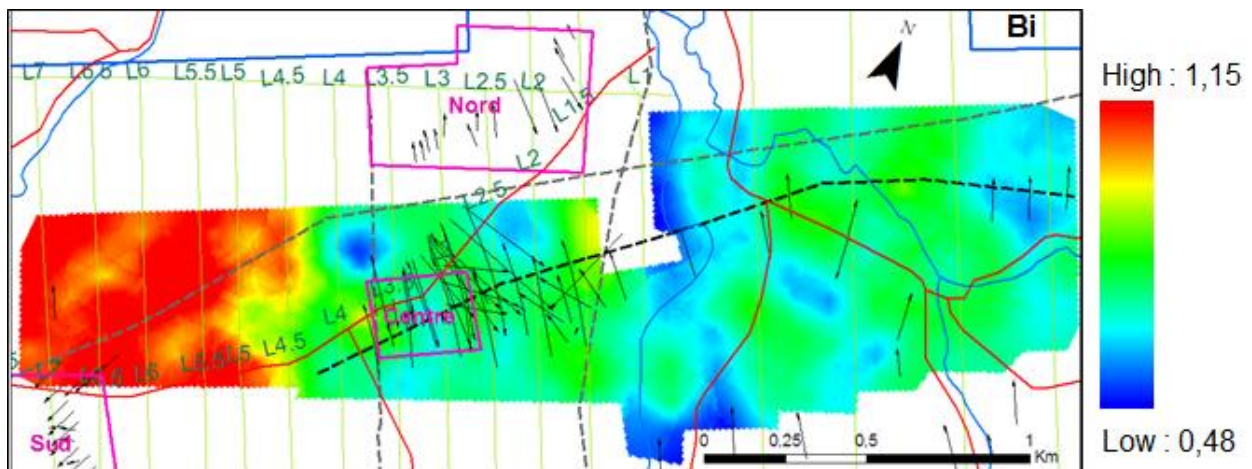


Figure 4.12 : Carte d'abondance relative du Bi dans le sol d'après la méthode de Tukey (1977). Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracé des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

L'histogramme des valeurs de Bi (Fig. 4.13) se présente sous forme d'histogramme en « peigne » caractéristique de valeurs qui ont été arrondies, probablement à cause de la précision de l'appareil de mesure.

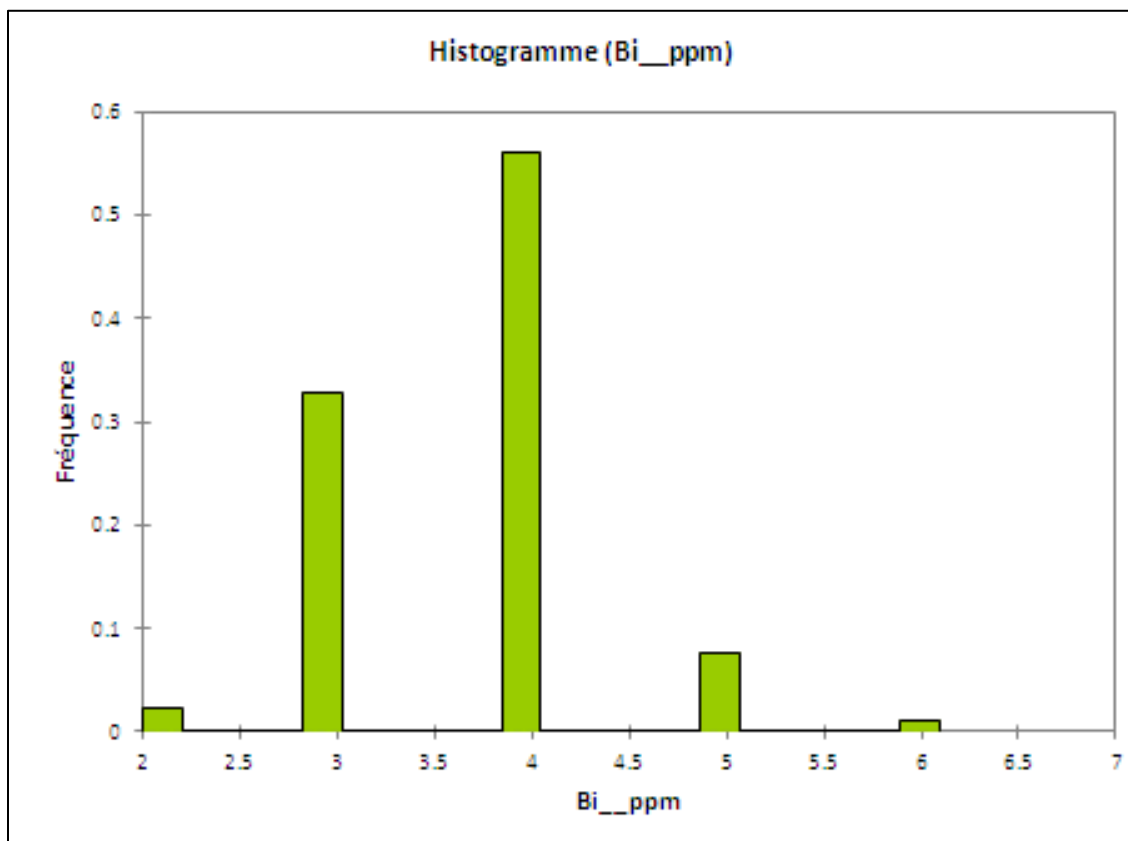


Figure 4.13 : Histogramme de la fréquence en fonction des concentrations brutes de Bi (ppm) pour tous les horizons échantillonnés.

En traçant un graphique des concentrations relatives de Bi (Fig. 4.14) pour chaque horizon, nous pouvons noter un regroupement important des valeurs. Ces valeurs correspondent donc probablement au bruit de fond. De ce fait, plutôt que d'utiliser la méthode de Tukey, nous avons calculé les concentrations relatives en Bi en exprimant le bruit de fond comme étant la médiane des concentrations mesurées. On obtient ainsi des valeurs de bruit de fond de 4 ppm pour chaque horizon. Il n'est donc pas nécessaire de faire de correction pour cet élément.

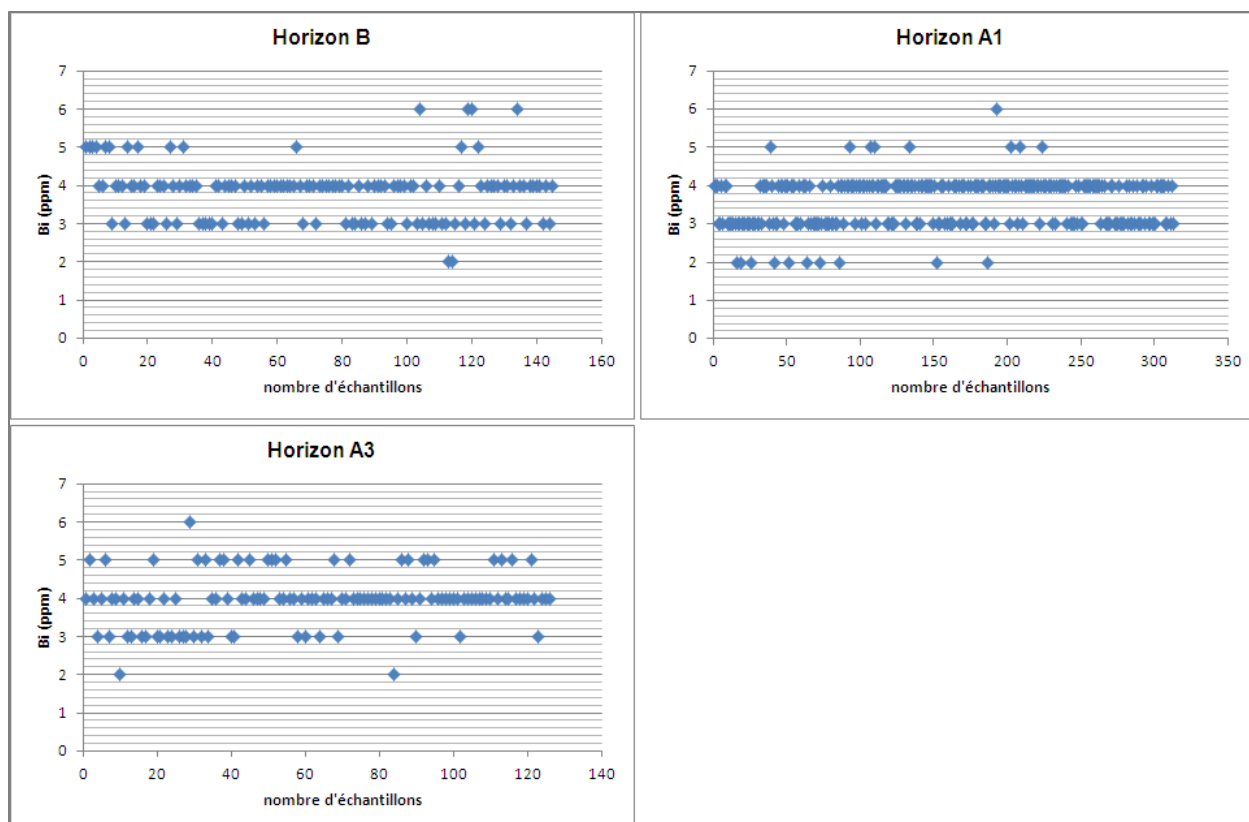


Figure 4.14 : Graphiques des concentrations en Bi (ppm) pour les horizons A1, A3 et B. On observe une médiane d'environ 4 ppm pour chaque horizon.

Finalement, après normalisation des données pour un bruit de fond de 4 ppm, la figure 4.15 révèle la présence de cinq zones enrichies en bismuth :

1. Une zone d'environ 600 mètres de long par 100 mètres de large, entre la zone Centre et la rivière du Loup (Lignes 1.5 et 2), le long d'une des failles « magnétiques » orientées N150. Le levé pédogéochimique ne continue pas plus au nord; néanmoins, la zone Nord est caractérisée par la présence de cosalite (minéral de bismuth) nous indiquant donc une probable continuité de cette zone riche en Bi vers le nord. Dans cette zone se trouve les forages N2, N3, N4, N10, R11, J83-13 et J83-14.
2. Une zone au niveau de l'intersection des failles « magnétiques » N150 et N50 (L4 et 3.5), située au même endroit que les zones enrichies en Ag et Pb. Les forages J84-08, J83-22, S9 et S10 recoupent cette zone.

3. Un corridor orienté N20° et situé au nord de la zone Sud de 500 mètres de long sur 100 mètres de large qui se termine au niveau de la zone Sud. Cette zone est recoupée par les forages J84-07 et J83-21.
4. Une zone au nord-ouest du levé pédogéochimique au niveau de la ligne 7, ne recoupant ni forages ni affleurements.
5. Enfin deux zones à l'est de la rivière du Loup proche d'un affleurement présentant des veines de quartz minéralisées et de la faille « sismique ». Les forages J83-20 et J5 passent proche de ces zones.

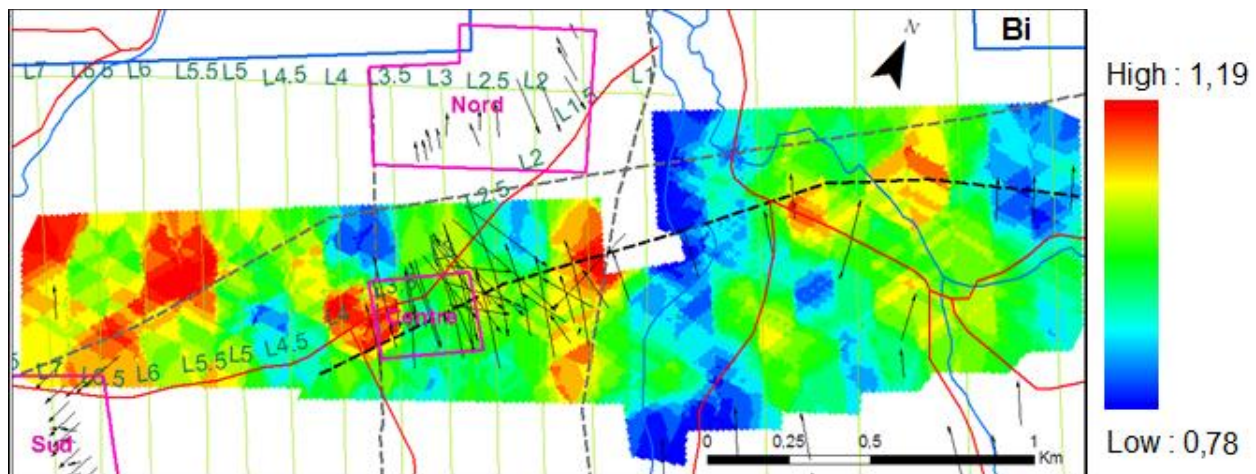


Figure 4.15 : Carte des abondances relatives du Bi dans le sol après modification du seuil de normalisation. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracé des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

La distribution des concentrations en **tungstène** dévoile une zone potentiellement intéressante située entre les failles « magnétique » et « sismique » à environ 250 mètres à l'est de la rivière du Loup (VIII). Cette zone semble se superposer à la position approximative de l'intrusif (Fig. 4.18).

Entre les lignes 5.5 et 4.5, on retrouve une zone avec quelques concentrations en tungstène importantes (zone III et IV). Aucun forage n'intercepte cette dernière. D'un autre côté, les anomalies en tungstène secondaires sont distribuées d'une façon irrégulière sans regroupements significatifs (Fig. 4.16).

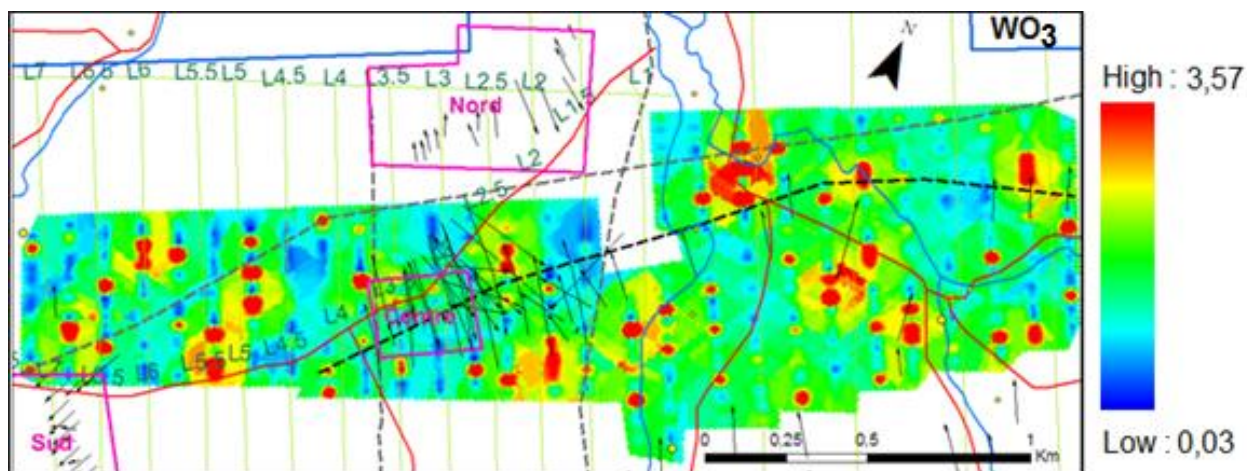


Figure 4.16 : Carte des abondances relatives du WO_3 dans le sol. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracé des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

La distribution du **molybdène** sur la propriété montre la présence de trois zones anomaliques relativement bien définies (Fig. 4.17) :

- 1- Deux zones situées à l'est de la rivière du Loup, centrées sur les forages J83-20 et J84-13.
- 2- Plusieurs petites zones au sein du corridor enrichi en Pb (Fig. 4.9).
- 3- Une zone dans la prolongation est de la zone Centre (lignes 1.5 et 2). Les forages R1, R9, R11, J83-12, J83-13 et J83-14 interceptent cette zone.

La position de l'anomalie circulaire située à l'est de la rivière du Loup correspond aussi à celle d'une anomalie en tungstène localisée au-dessus de la masse intrusive. Une minéralisation porphyrique en W-Mo pourrait être située sous les sols de ce secteur.

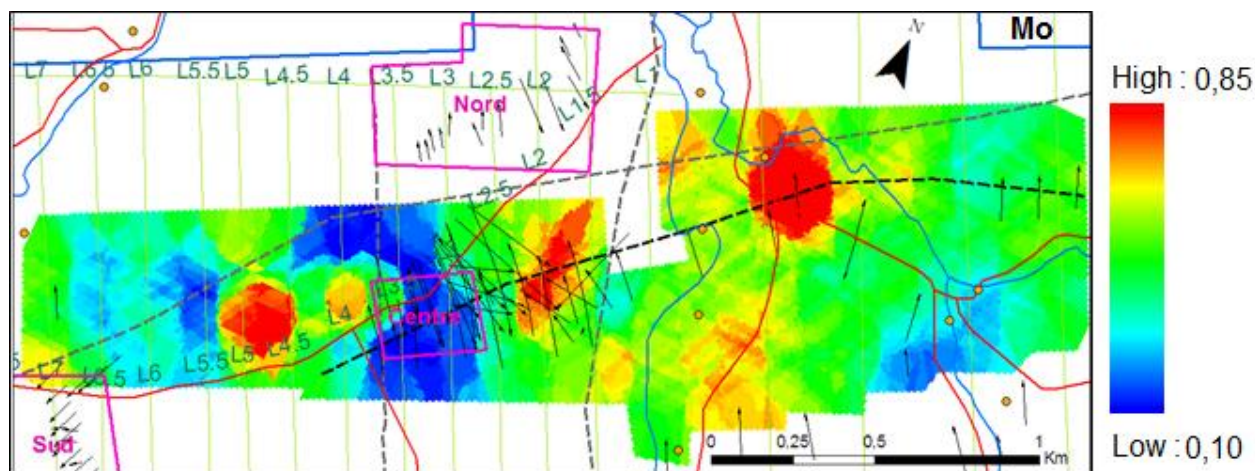


Figure 4.17 : Carte des abondances relatives du Mo dans le sol. Carte issue de l'interpolation par krigeage. Lignes pointillées : failles « sismiques » (noir) et « magnétiques » (grises); flèches : tracés des forages; lignes vertes : nouvelles lignes.

4.3.2 Discussion

Afin de déterminer de nouvelles cibles d'exploration, à partir des informations provenant du traitement des données pédogéochimiques, nous avons vérifié les anciens journaux de sondage des forages réalisés sous ou en bordure des zones anomaliques enrichies en Pb-Ag-Au-Bi-WO₃-Mo (Fig. 4.18).

Les sondages recoupant la zone riche en **plomb, argent et bismuth** bordant l'extrémité ouest de la zone Centre (III, IV et V) montrent effectivement la présence de veines et veinules de quartz contenant des minéralisations en galène argentifère et pyrite. Toutefois, très peu d'analyses en plomb ont été effectuées dans les sondages, mais on retrouve quand même quelques valeurs importantes : 3,75 % de Pb dans le forage J83-22 par exemple avec une moyenne de 1,2 % et sur 38 analyses en argent (forages J83-21, J83-22, J84-07 et J84-08), la moyenne est de 55 g/t d'Ag (conc. max. : 441 g/t dans le forage J83-21). Dans le forage J83-21, le géologue Denis Tremblay décèle même la présence d'acanthite (Ag₂S). Les zones riches en bismuth et tungstène ont malheureusement été peu recherchées. Une étude détaillée de cette zone devrait être envisagée.

Dans la zone secondaire enrichie en **argent et bismuth** qui a été recoupée par le forage J13 (partie ouest du levé, I), 35 analyses en Ag ont été effectuées donnant une moyenne très faible de 0,65 ppm d'Ag pour une concentration maximale de 4,9 ppm et trois analyses en Bi d'une moyenne de 3 ppm (conc. max. : 5 ppm).

Quelques veines de quartz minéralisées en pyrite et galène ont cependant été répertoriées. Toutefois, seulement un sondage a été effectué pour une zone de plus de 500 mètres de long (J-13).

Dans la zone située entre les lignes 19 et 21 (X), qui présente un enrichissement des sols en **argent et bismuth**, aucune analyse n'a été menée dans le forage J84-15, mais de nombreuses veines de quartz ne présentant pas de minéralisations visibles à l'œil nu ont été notées. Pour le forage J5, 17 échantillons ont été analysés pour l'Ag montrant une moyenne de 0,48 ppm d'argent pour une concentration maximale de 0,7 ppm et les deux analyses en Bi donnent une moyenne de 4 ppm avec une concentration maximale de 5 ppm. Cependant, ces deux forages se situent un peu plus au sud de la zone d'enrichissement et n'interceptent probablement pas la minéralisation s'il y en a.

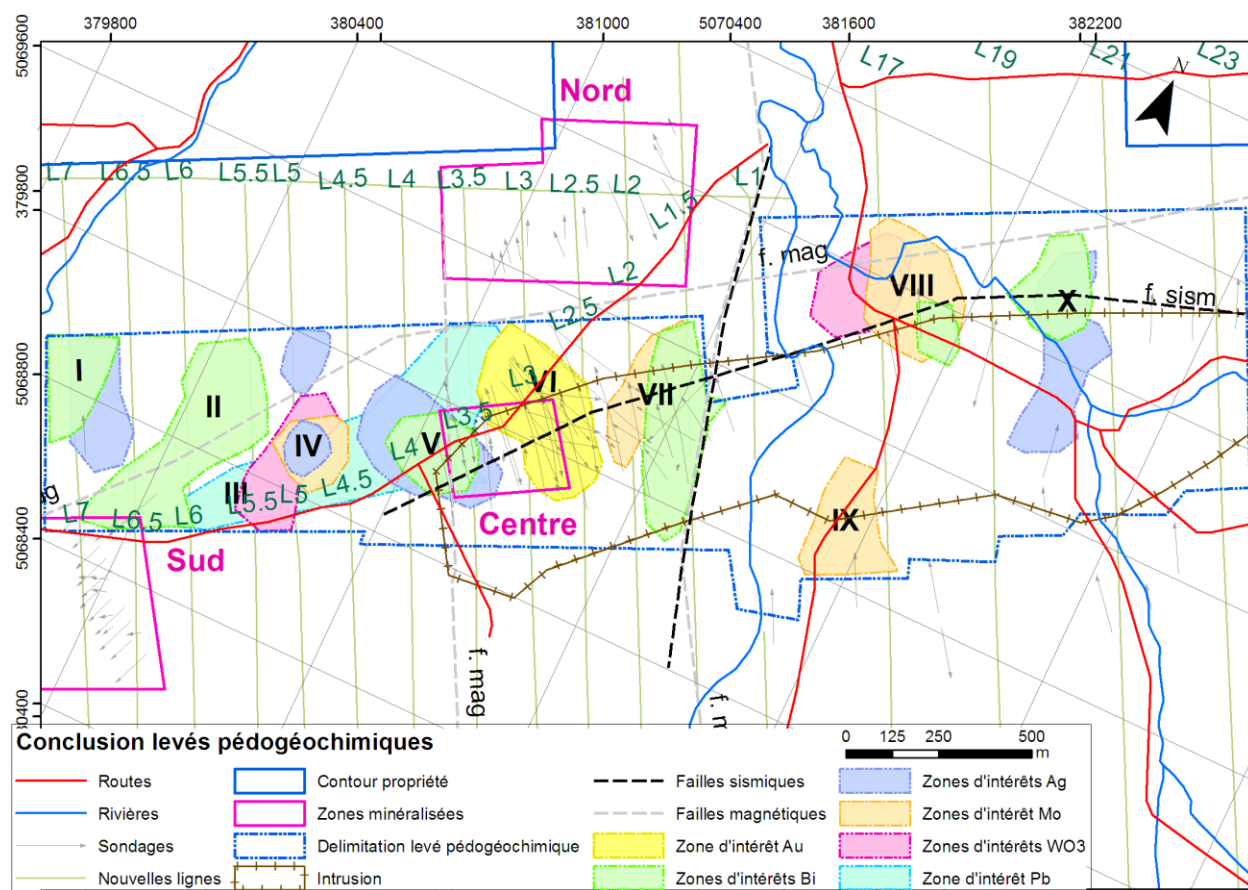


Figure 4.18 : Carte de compilation des zones enrichies en Ag, Pb, Au, Bi et Mo tirées des cartes krigées.

La zone minéralisée Centre a longtemps été reconnue comme étant riche en **or** et de nombreux forages ont été implantés dans cette zone. A l'époque où la propriété était détenue par *St-Robert Metals*, les analyses ont montré de hautes teneurs en or au sein de cette zone. La présence d'une minéralisation en or à cet endroit pourrait expliquer la présence de la zone anomalique (VI) en or observée dans les sols. Toutefois, la compagnie *Les Mines J.A.G.* a essayé de retrouver le corps minéralisé en or en procédant à l'implantation de dizaines de forages sans parvenir à des résultats probants.

Le graphique ci-dessous (Fig. 4.19) présente les concentrations en Ag et en Au obtenues pour les forages de la zone centre effectués par *St-Robert Metals* (en rouge) et par les *Mines J.A.G. Itée* (en bleu). Le fait qu'il n'y a aucune valeur en Au entre 0,5 et 500 ppb pour les analyses de la *St-Robert Metals* indique probablement que la limite de détection de ces dernières était d'environ 500 ppb.

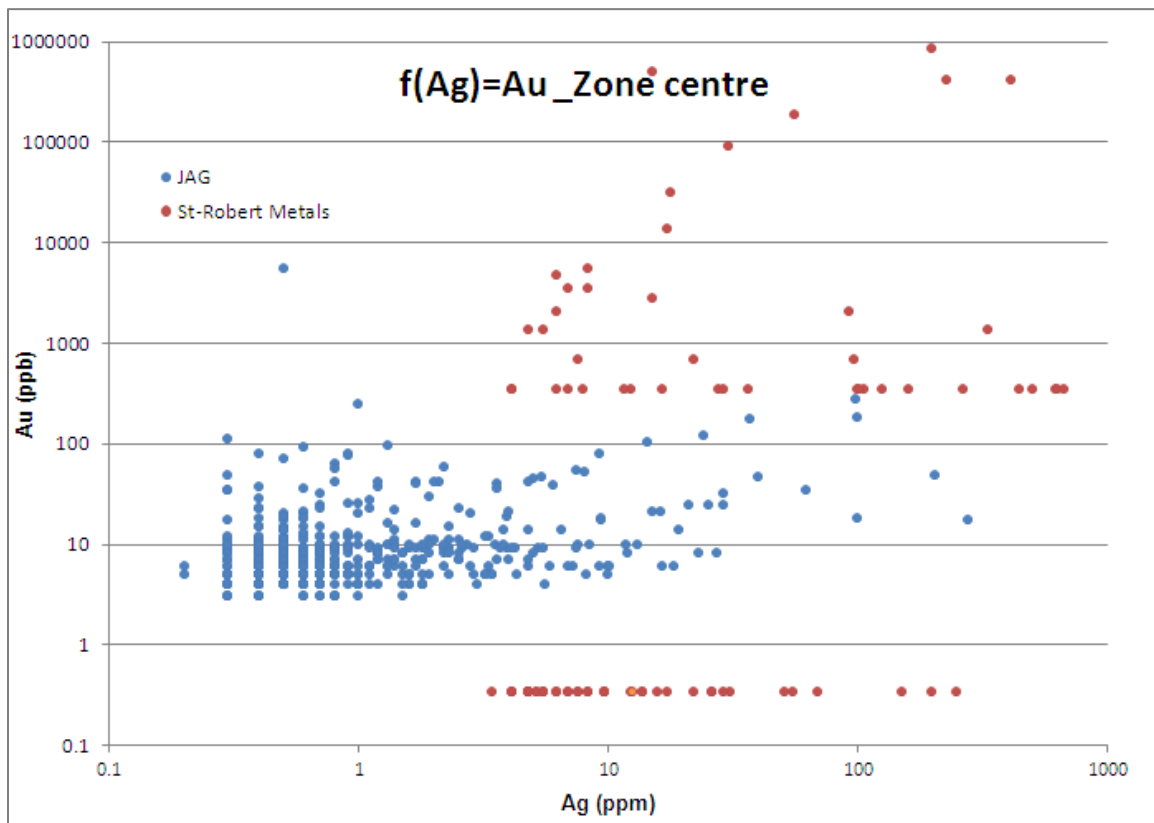


Figure 4.19 : Graphique représentant les concentrations en Au (ppb) en fonction de l'Ag (ppm) issues des analyses lithogéochimiques des échantillons provenant de forages de la zone Centre réalisés par les *Mines J.A.G. Itée* (bleu) et la *St-Robert Metals Corp.* (rouge).

Nous pouvons noter un très fort enrichissement en or et en argent des échantillons provenant des forages de St-Robert Metals avec des moyennes en or de 29 406 ppb (sur 84 valeurs) contre 21 ppb (sur 593 valeurs) pour les forages réalisés par Les Mines J.A.G. Itée. Deux hypothèses peuvent être énoncées afin d'expliquer cette différence :

- les résultats de St-Robert Metals seraient erronés, ou auraient été volontairement modifiés;
- les forages des Mines J.A.G. Itée n'auraient pas intercepté le corps minéralisé en or. Les rapports des campagnes de forage indiquent en effet la présence de failles et de difficultés à maintenir l'angle de plongée des forages.

La géochimie des sols indique bien un net enrichissement en or dans cette zone (zone VI). De même, les analyses géochimiques réalisées sur les sédiments de ruisseau par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec dans la rivière du Loup située au pied du bassin versant de la zone Centre révèlent également un enrichissement en or significatif (Fig. 4.20). Il serait donc possible que les forages effectués par la compagnie les Mines J.A.G. Itée n'aient pas intercepté le corps minéralisé en or déterminé par St-Robert Metals. Cependant, beaucoup de forage ont été réalisés. Ces hypothèses seront discutées dans l'étude 3D du chapitre 5.

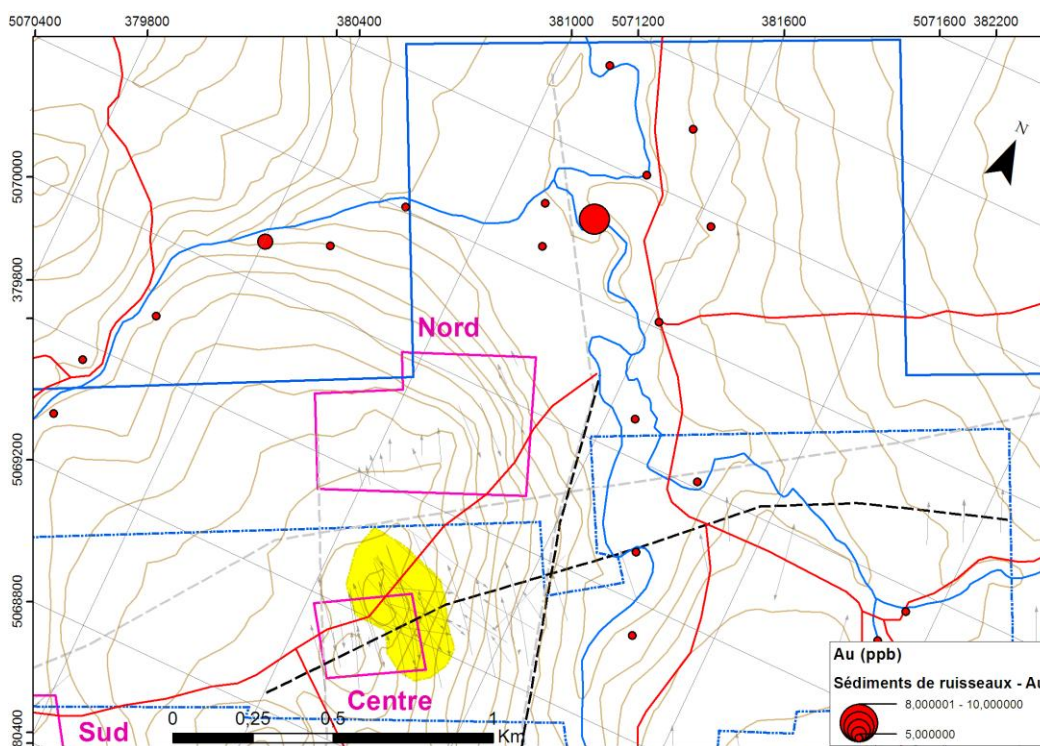


Figure 4.20 : Carte de compilation montrant la zone de sol enrichie en or, la concentration en Au des sédiments de ruisseaux (MRNF) ainsi que la zone Centre présentant des minéralisations en or selon les données historiques. Les courbes topographiques montrent le dénivelé entre la zone Centre et la rivière du Loup.

D'après les journaux de sondage, la zone enrichie en **bismuth** à l'est de la zone centre (VII, Fig. 4.18) présente de nombreuses veines de quartz minéralisées en cosalite. Quelques analyses ont été effectuées donnant des valeurs allant de 0,001 à 0,5 % de Bi (N2, N3, N4, N10, J83-13 et J83-14).

Du côté ouest de cette dernière zone, les forages R1, R9, R11, J83-12, J83-13 et J83-14 interceptant la zone enrichie en **molybdène** contiennent en effet quelques veines de quartz minéralisées en molybdène. Toutefois, seulement deux analyses ont été menées donnant des valeurs d'environ 0,1 %.

Enfin la zone enrichie en **bismuth, tungstène et molybdène** (VIII) à l'est de la rivière du Loup est recoupée par le forage J83-20. Ce dernier contient de nombreuses veines de quartz minéralisées en cosalite et en molybdénite. Jean-Raymond Frédéric décela même la présence de scheelite dans une intrusion porphyrique interceptant le forage. Malheureusement, une seule analyse a été réalisée donnant une valeur de 0,02 % en Bi. Aucune analyse en tungstène et molybdène n'a cependant été réalisée. Une étude détaillée de ces trois dernières zones serait pertinente.

Les deux forages J84-07 et J83-21 situés près d'une autre zone enrichie en **bismuth** (I, Fig. 4.18) (au nord de la zone Sud), ne contiennent vraisemblablement pas d'intersections minéralisées en cosalite. Une seule analyse en Bi a été réalisée donnant une valeur de 0,03 %.

La zone enrichie en **molybdène** (IX) au sud-est du levé est recoupée par le forage J84-13 mais celui-ci ne montre pas de présence de veines de quartz minéralisées et aucune analyse n'a été effectuée. De plus, ce forage touche à peine la limite sud de cette zone.

Enfin les zones montrant un enrichissement en certains éléments qui n'ont pas été forés pourraient présenter des intérêts. Il serait donc intéressant de les étudier à l'aide de nouveaux forages et d'autres levés géophysiques.

Nous pouvons noter que la plupart des zones d'intérêts sont situées près des tracés des failles sismiques et magnétiques. Cette observation renforce la probabilité que ces zones soient d'intérêt économique.

4.4 Analyse en composantes principales

4.4.1 Méthodes

L'analyse en composantes principales (ACP) est l'une des techniques d'analyse de données multivariées la plus simple et la plus utilisée. Elle permet de corrélérer de manière concise une multitude de variables entre elles ainsi que de répartir simplement les individus en différents groupes. Cette méthode consiste à décorrélérer les variables entre elles pour former de nouvelles variables synthétiques dites « composantes principales » ou encore « axes », qui seront plus limitées en nombre que les variables initiales.

Le logiciel XLSTAT a été utilisé pour réaliser l'analyse en composantes principales à partir de nos données relatives. La procédure consiste tout d'abord à calculer la matrice des corrélations afin de donner le même poids à chacune des variables pour ensuite diagonaliser cette matrice afin d'obtenir les valeurs propres représentant les variances des individus sur les axes principaux correspondants. Afin de déterminer les nombres d'axes à interpréter, on retient ceux auxquels correspondent des valeurs propres supérieures à 0,8. Comme nous l'avons vu dans la première partie, afin d'effectuer une analyse plus juste des données, il est nécessaire d'utiliser les données relatives calculées précédemment.

4.4.2 Résultats et discussion

Dans le cas du levé pédogéochimique de St-Robert, nous avons retenu les axes F1, F2, F3 et F4 qui expliquent plus de 80% de la variabilité (Tab. 4.2 et Fig. 4.21).

Tableau 4.2 : Valeurs propres, variabilité et pourcentage de variabilité cumulée pour les différents axes.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propre	1,902	1,103	1,002	0,913	0,699	0,381
Variabilité (%)	31,696	18,387	16,706	15,212	11,651	6,348
% cumulé	31,696	50,083	66,789	82,001	93,652	100,000

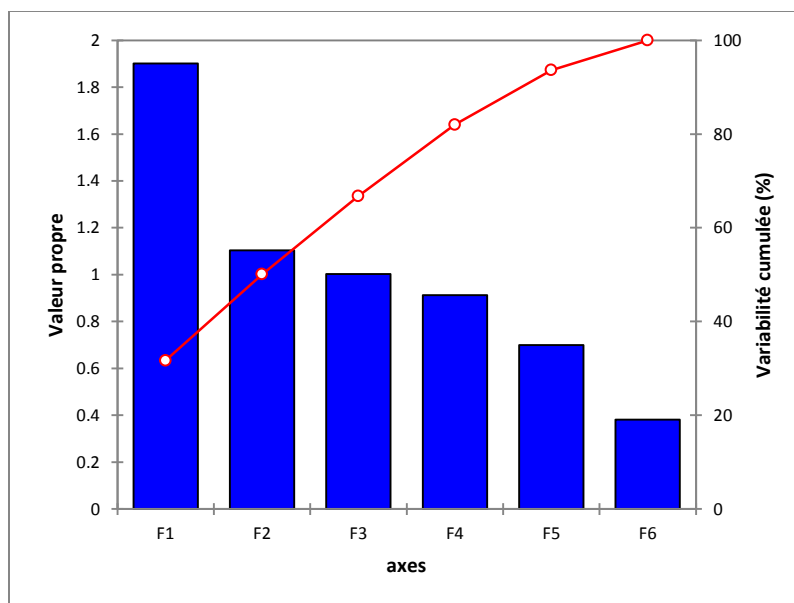


Figure 4.21 : Représentation graphique des valeurs propres (bar bleu) et variabilités cumulées (courbe rouge) pour les différents axes.

A l'aide de la matrice de corrélation (Tab. 4.3) et des cercles de corrélations correspondants (Fig. 4.22 et 4.23), nous pouvons noter que l'argent, le plomb et le bismuth sont très fortement corrélés entre eux et dominent les valeurs positives de l'axe F1 (Fig. 4.22 et 4.23; cercles de corrélation F1-F2; F1-F3 et F1-F4). L'axe F2 montre un regroupement du WO_3 et Mo se projetant dans le domaine de valeurs négatives de cet axe. Ce regroupement pourrait être important, car il pourrait indiquer la présence de minéralisations porphyriques W-Mo sur la propriété. Ces minéralisations devraient être relativement proximales par rapport à la masse intrusive.

Tableau 4.3 : Matrice des corrélations entre les différents éléments chimiques.

Variables	WO_3 rel	Pb rel	Bi rel	Mo rel	Ag rel	Au rel
WO_3 rel	1	0,060	-0,069	0,016	0,037	-0,036
Pb rel	0,060	1	0,304	0,065	0,603	0,114
Bi rel	-0,069	0,304	1	0,007	0,387	0,072
Mo rel	0,016	0,065	0,007	1	0,086	-0,069
Ag rel	0,037	0,603	0,387	0,086	1	0,027
Au rel	-0,036	0,114	0,072	-0,069	0,027	1

La forte corrélation entre le plomb et l'argent est en accord avec la minéralogie des zones minéralisées de la propriété. En effet, le gîte de St-Robert est caractérisé par la présence de galène argentifère. Nous pouvons donc en déduire que les métaux présents dans les sols sont bien issus des minéralisations de St-Robert. De même, la forte corrélation entre le plomb et le bismuth se retrouve sur la propriété sous forme de cosalite ($\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$). La corrélation entre l'argent et le bismuth suggère donc qu'il est possible de retrouver de la minéralisation en argent dans la cosalite. Cette observation a été vérifiée dans le chapitre 3 à l'aide du système EDS du microscope électronique à balayage. Enfin, d'autres points importants peuvent être retenus :

- l'or sur la propriété de St-Robert n'est corrélé avec aucun élément;
- l'or ne semble pas associé minéralogiquement avec les autres éléments analysés; de ce fait, l'or se retrouve probablement sous forme native ou dans la pyrite et non en inclusion dans la galène argentifère ou la cosalite;
- la propriété de St-Robert a subi plusieurs épisodes de minéralisations;
- le regroupement WO_3 -Mo indiqué par l'axe F2 et observé par une superposition des anomalies en WO_3 et Mo (Fig. 4.16, 4.17 et 4.18) dans la zone anormale VIII suggère une association WO_3 -Mo localisée au-dessus du corps intrusif.

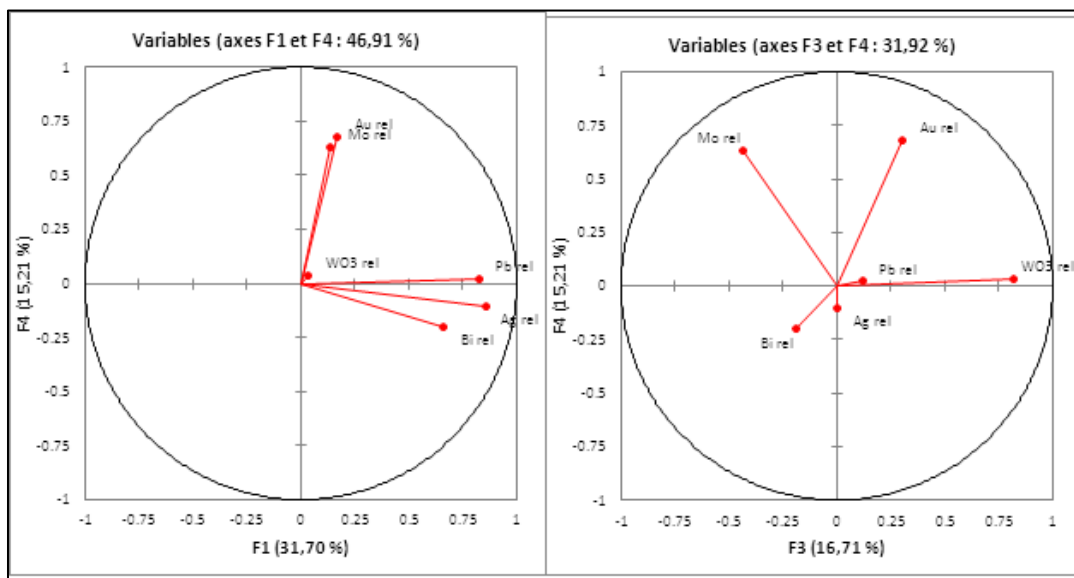


Figure 4.22 : Cercles de corrélation entre les variables Au, Mo, Bi, Pb, Ag, WO_3 et les composantes principales F1, F3 et F4.

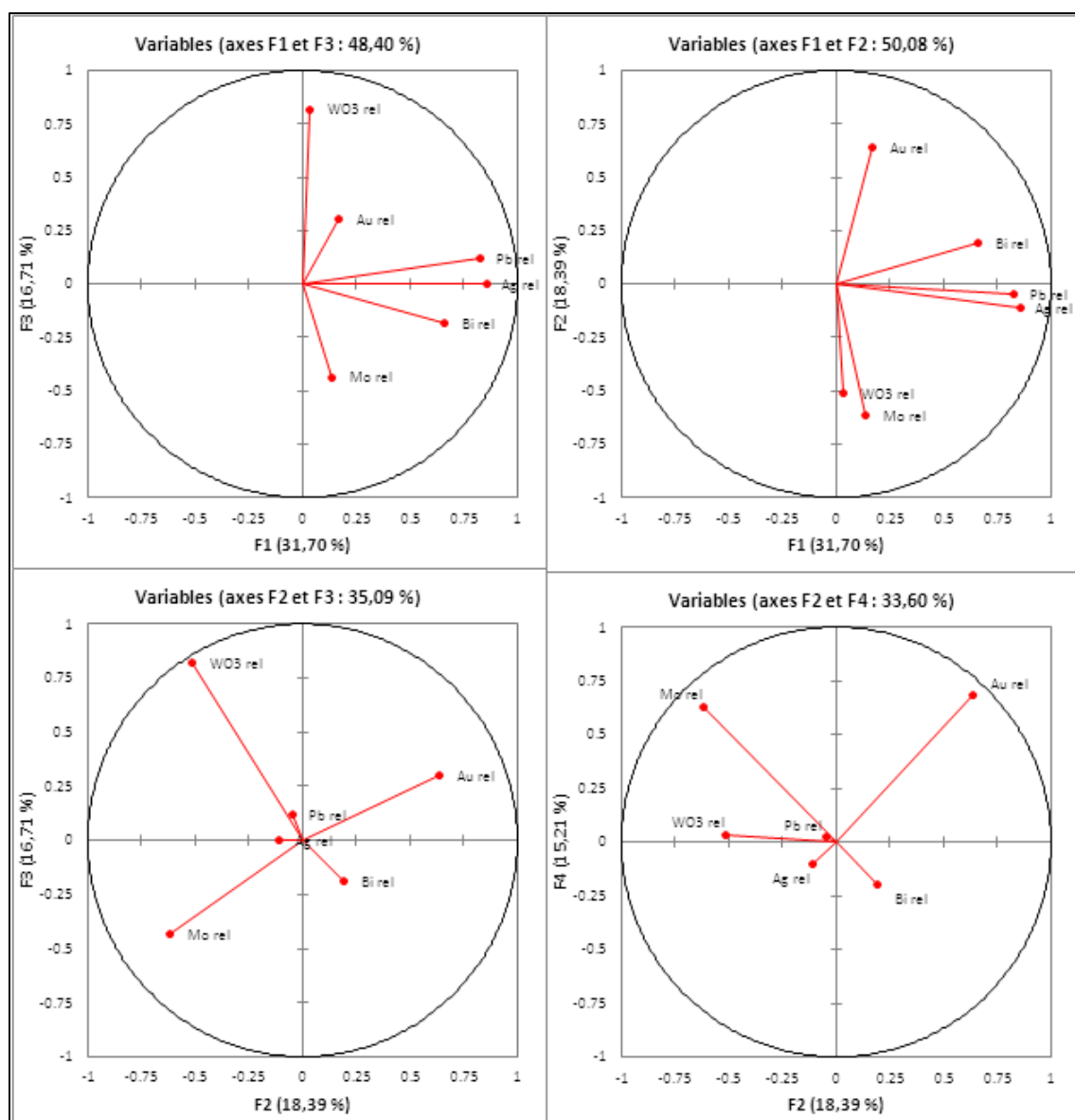


Figure 4.23 : Cercles de corrélations entre les variables Au, Mo, Bi, Pb, Ag, WO₃ et les composantes principales F1, F2, F3 et F4.

4.5 Conclusion du chapitre

L'étude pédogéochimique de la propriété de St-Robert montre que l'utilisation de méthodes d'exploration pédogéochimique nécessite de nombreuses vérifications. Tout d'abord, dans les zones où de nombreuses glaciations ont eu lieu, il faut vérifier que la dispersion des particules minérales érodées du socle rocheux ne soit pas trop importante. De plus, dans le cas où l'échantillonnage de sol a été réalisé dans plusieurs horizons de sol différents, il est fortement recommandé d'effectuer une analyse statistique préliminaire afin de déterminer si ces différents horizons jouent un rôle sur la répartition des métaux. Si c'est le cas, il est nécessaire de corriger les valeurs grâce au bruit de fond géochimique pour chaque horizon. Dans le cadre de notre étude, la méthode de Tukey (1977) a été très utile pour déterminer le bruit de fond géochimique. Il est cependant impératif que les données analytiques n'aient pas été arrondies avant leur traitement.

Pour les minéralisations en Pb-Ag-Bi, W-Mo et Au, la géochimie des sols reflète bien la présence des principales zones minéralisées dans le roc, et ce, même si localement la couverture de mort-terrain est importante. De plus, les relations entre la géologie du socle rocheux et la géochimie des sols sont très importantes. En effet, nous avons pu noter que la plupart des zones d'intérêts se situent près des principales anisotropies sismiques et magnétiques interprétées dans cette étude comme étant des failles. De ce fait, ces dernières devraient constituer de nouvelles cibles d'exploration pour la région.

Plusieurs nouvelles zones d'intérêts ont pu être mises au jour grâce aux résultats de ce levé. Dans la majorité des cas, peu de sondages et d'analyses ont été réalisés dans ces nouvelles zones. Pour les autres, les sondages montrent une bonne corrélation entre les valeurs pédogéochimiques et lithogéochimiques.

La présence d'un net enrichissement en or dans la zone centre ainsi que l'anomalie positive en Au des sédiments de ruisseau situés au pied du bassin versant de la zone Centre viennent appuyer les résultats des forages de la *St-Robert Metals*, qui, dans les années 1950 avait trouvé la présence d'or dans l'extension est de la zone Centre. Cette cible avait ensuite été visée par les forages de Mines JAG Ltée dans les années 1980. Malheureusement, en fonction de nos reconstitutions 3D des forages, il semble que la cible aurifère découverte par la *St-Robert Metals* aurait été ratée par les forages de Mines JAG Ltée. Notez que ces derniers ont probablement dévié dans la forte épaisseur de mort-terrain au sud de la zone de faille de St-Robert.

La pédogéochimie a également montré une corrélation positive entre les concentrations en bismuth et en argent. Ceci s'explique par l'observation, jusqu'ici non documentée, de la présence de cosalite et de bismuthinite argentifère dans la zone Nord.

Enfin, l'analyse en composante principale nous a permis de regrouper les minéralisations en trois groupes : Pb-Ag-Bi, W-Mo et Au. Ce regroupement compositionnel et spatial suggère plusieurs épisodes de minéralisation. Pour les groupes Pb-Ag-Bi et W-Mo, la zonalité observée pourrait refléter des minéralisations distales et proximales par rapport à la masse intrusive de St-Robert comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.

Compte tenu des résultats probants obtenus, il est fortement recommandé de compléter le levé pédogéochimique sur le reste de la propriété.

CHAPITRE 5 : ÉTUDES GEOCHIMIQUES

5.1 Échantillonnage

Lors des travaux de terrain 2011, plus de 250 échantillons ont été prélevés. Cet échantillonnage a consisté en un prélèvement à la main d'environ 80 échantillons de roches (sédimentaires, ignées et veines de quartz) ainsi qu'un échantillonnage en rainure à la scie à diamant des principales veines minéralisées et de leurs épontes (Fig. 3.10 à 3.14). De plus, un échantillonnage à la scie à diamant d'une vingtaine de surfaces rocheuses situées le long de l'affleurement principale de la zone Centre a également été effectué lors de travaux préliminaires à l'automne 2010. Ces échantillons ont été analysés pour déterminer leurs compositions en métaux, en éléments majeurs et traces.

La figure 5.1 montre la répartition des échantillons prélevés sur la propriété St-Robert en 2011. Les résultats d'analyses ainsi que leurs coordonnées UTM sont présentés en annexe D. Dans cette section du mémoire, nous allons déterminer géochimiquement les types de roches intrusives ou sédimentaires présentes sur la propriété St-Robert. De plus, nous tenterons de préciser le contexte géodynamique probable de mise en place de ces roches dans le but de comprendre le contexte géologique de mise en place des minéralisations de la propriété St-Robert.

Dans ce chapitre, nous ferons également la synthèse des résultats obtenus lors des travaux d'échantillonnage des zones minéralisées. Ces données serviront à comprendre la répartition des métaux dans les veines de quartz et leurs épontes.

Enfin un aperçu de l'utilisation de la radiométrie sur la propriété St-Robert sera brièvement présenté dans une dernière partie.

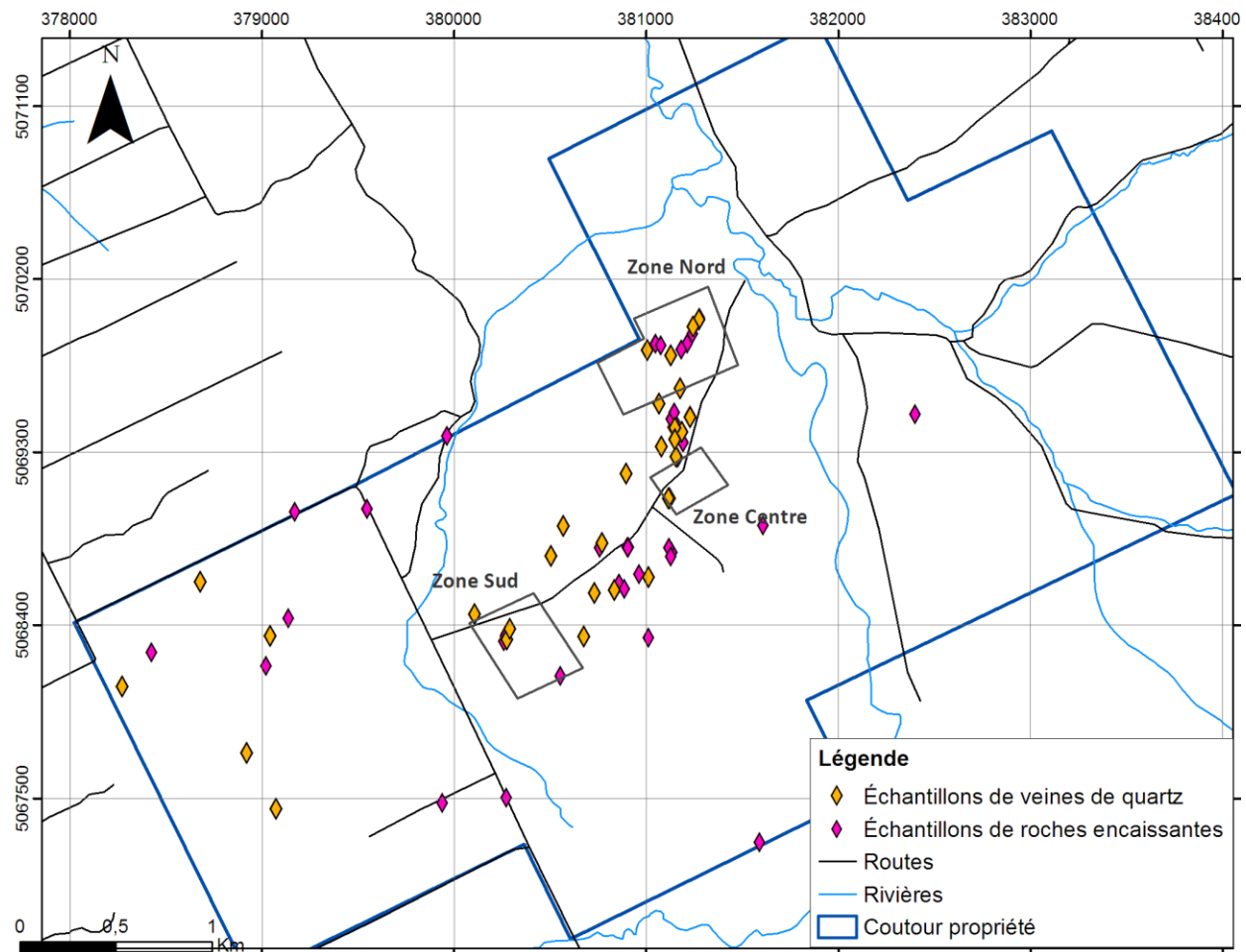


Figure 5.1 : Plan de localisation des échantillons ramassés à la main sur la propriété de St-Robert.

5.2 Méthodes analytiques

5.2.1 Préparation des échantillons

Pour un contrôle rigoureux de la qualité des échantillons à analyser, leur préparation (sciage, concassage, broyage) a été effectuée par nos soins au sein des laboratoires de l'INRS. Les zones d'altérations météoriques ainsi que les veinules de quartz recoupant les échantillons de roches ignées et sédimentaires ont été supprimées lors d'un sciage préliminaire à la lame à diamant pour éviter toute contamination de l'échantillon. Ensuite, un premier concassage a été obtenu à l'aide d'un broyeur à mâchoires d'acier nettoyé à la brosse, à l'air comprimé et au quartz pur entre chaque échantillon afin de minimiser la contamination. Le concassé a ensuite été quarté pour s'assurer de l'homogénéité de l'échantillon pour enfin subir une pulvérisation.

Les échantillons prélevés sur l'affleurement principal de la zone Centre ont été pulvérisés à l'aide d'un pulvérisateur en agate pour éviter toutes contaminations métalliques. Les autres échantillons ont été pulvérisés à l'aide d'un pulvérisateur à disque en ferrochrome. Ces disques ont été nettoyés à l'air comprimé, à l'aspirateur et au quartz pur entre chaque échantillon. L'utilisation du pulvérisateur en ferrochrome peut entraîner une légère contamination de nos échantillons en Fe et en Cr. Dans notre étude, l'importance du Cr est mineure, et la contamination en fer est négligeable compte tenu des hautes concentrations en fer de nos échantillons.

5.2.2 Analyses

Les échantillons des zones minéralisées, prélevés à la scie à diamant, ont été analysés par le laboratoire d'analyse *Activation Laboratories Ltd* (Ancaster, Ontario) à l'aide de la technique d'activation neutronique instrumentale (INAA) et de la spectrométrie de masse à source plasma (ICP-MS). Les échantillons analysés par ICP-MS ont été digérés par la méthode des quatre acides (HF, HClO₄, HNO₃ et HCl).

L'analyse instrumentale par activation neutronique est une méthode d'analyse géochimique non destructive permettant de doser la concentration d'élément chimique dans les roches (Ag, As, Au, Ba, Br, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Hg, Ir, La, Lu, Mo, Na, Nd, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, U, W, Yb et Zn). Cette méthode consiste à irradier l'échantillon à analyser par un flux de neutrons thermiques.

Les noyaux atomiques des différents éléments contenus dans l'échantillon subissent ensuite des réactions nucléaires qui conduisent à la formation d'isotopes radioactifs instables. Ces isotopes sont alors identifiés et quantifiés par l'étude de leur spectre de rayons γ à l'aide de détecteurs au germanium de haute résolution.

Le reste des échantillons a été analysé par nos soins dans les laboratoires de l'INRS à l'aide de l'ICP-MS pour l'analyse des éléments traces et de l'ICP-AES pour l'analyse des éléments majeurs et de certains éléments traces plus abondants. La préparation des solutions à analyser a été faite par la méthode de fusion alcaline au métaborate de lithium et reprise dans une solution d'acide nitrique. Cette méthode repose sur la fusion de poudres de roche dans un creuset en platine avec du métaborate de lithium en excès. Le résidu de fusion est ensuite incorporé dans une solution d'acide nitrique afin que les métaux passent en solution. Cette solution est ensuite diluée et analysée par spectrométrie d'émission atomique couplée à un plasma inductif (ICP-AES) pour les éléments majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 et TiO_2) et les éléments traces comme As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, S, Sc, Sr, V, Y, Zn et Zr. Pour l'analyse des autres éléments traces comme les lanthanides (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu), actinides (Th, U) et autres éléments traces (Cs Hf, In, Nb, Rb, Sr, Ta, Y, Zr, Ag, As, Bi, Co, Mo, Pb, Sb, Sn, Te et W) les solutions ont été analysées par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS).

Enfin, les échantillons dont les valeurs en Pb et Bi mesurées à l'ICP-MS par *Activation Labs* étant supérieures aux limites de détection maximum de l'ICP-MS (5000 ppm pour le Pb et 2000 ppm pour le Bi) ont été réanalysés en effectuant une fusion au peroxyde de sodium (Na_2O_2) et une dissolution à l'acide.

Pour les 70 échantillons contenant plus de 1 % de soufre, nous les avons préalablement passés au four à 1025 °C afin de libérer le soufre pouvant endommager les creusets de platine lors de l'étape subséquente de fusion alcaline. Pour connaître leurs compositions en soufre, carbone et azote, nous avons ensuite utilisé la méthode d'analyse élémentaire à l'aide du système de mesure LECO de l'INRS.

Les résultats obtenus sont présentés en annexe D2.

5.3 Transformations et validation des données

Dans les résultats analytiques, le Fe_2O_3 correspond au fer total analysé. Les concentrations en FeO_t des échantillons ont été calculées en multipliant les concentrations en Fe_2O_3 total par le facteur de conversion 0,8998 (Ragland, 1989). Les concentrations en éléments majeurs produites par *ActLabs* sont exprimées en pourcentage en poids d'éléments (c.-à-d. Si). Pour les transformer en pourcentage en poids d'oxyde (c.-à-d. SiO_2), nous les avons multipliées par un facteur de conversion F obtenu en divisant le poids moléculaire de l'oxyde de l'élément total par le poids moléculaire de l'élément. Par exemple, pour obtenir la concentration en SiO_2 à partir de la concentration en Si, le facteur de conversion est égal à $28,0855 + 15,9994 \times 2 / 28,0855$ soit environ 2,14.

Pour la vérification de la qualité des analyses, les standards W2, BCR2, BHVO2, SARM 1 et SARM 5, des duplicatas d'échantillons et des solutions de « blancs » ont été analysés. Les pourcentages d'erreurs des déterminations par ICP-MS, ICP-AES et l'INAA sont présentés en annexe D4.

Sur les diagrammes multiéléments, les éléments ont été normalisés aux valeurs suggérées pour le manteau primitif terrestre selon Sun et McDonough (1989) et arrangés en ordre de compatibilité croissante vers la droite, tandis que les spectres de terres rares ont été normalisés aux chondrites de type C1 selon les valeurs suggérées par Sun et McDonough (1989). Ces valeurs sont présentées en Annexe D5.

Les diagrammes multiéléments, les spectres de terres rares et plusieurs des diagrammes discriminants ont été réalisés à l'aide du logiciel IgPet.

5.4 Variabilité géochimique des roches sédimentaires

Les roches sédimentaires de la propriété St-Robert n'ont jamais fait l'objet d'une étude géochimique. Le faible degré de métamorphisme et la présence d'un grand nombre d'échantillons de roches non altérées devraient permettre une caractérisation géochimique adéquate de ces dernières. L'identification des échantillons altérés est importante, car des éléments comme le sodium, le potassium et le calcium peuvent parfois être mobilisés lors des processus diagénétiques, métamorphiques et hydrothermaux. Ces processus de mobilisation sont toutefois plus fréquents dans les roches carbonatées (dolomitisation) que dans les roches détritiques siliciclastiques (grès et shales).

Dans le cadre de cette étude, nous avons également compilé et intégré dans les différents diagrammes les roches sédimentaires ferromanganésifères associées aux métavolcanites de la rivière Clinton (Chevé, 1990; annexe D3). Cette intégration de données de roches sédimentaires sert de base de comparaison entre différents environnements géologiques à l'intérieur de la Formation de Frontenac.

Compte tenu de la présence de grès, de siltstones et de shales sur la propriété St-Robert, il est évident qu'une grande partie de la variabilité géochimique observée devrait refléter la variation de la proportion de quartz et d'argiles lors de la sédimentation de ces roches au Dévonien. Ce point est important, car, pour identifier certains vecteurs d'altération potentiellement utiles pour l'exploration, il faut bien comprendre l'interaction des mécanismes responsables de la variabilité observée. La figure 5.2 présente pour les éléments majeurs la variation des concentrations en oxydes en fonction de la concentration en Al_2O_3 . Pour des roches détritiques siliciclastiques, l' Al_2O_3 peut être utilisé pour évaluer l'importance de la composante argileuse (ou de shales) dans les roches. Sur ces diagrammes, les grès tombent vers des concentrations en Al_2O_3 de l'ordre de 10 % tandis que les shales ont des concentrations généralement supérieures à 15 % Al_2O_3 . Cette tendance d'enrichissement en Al_2O_3 dans les shales de la propriété St-Robert est validée par les observations de terrain (granulométrie des roches). La figure 5.2 montre que les concentrations en Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 et TiO_2 sont fortement corrélées à celles de l' Al_2O_3 tandis que celles en MnO , MgO , CaO et Na_2O ne montrent pas de corrélations significatives. Pour le CaO , les analyses d'échantillon de grès montrent une dispersion le long d'un vecteur (identifié M sur la figure 5.2) orthogonal à celui relié aux processus sédimentaires (S). Ce vecteur M, également observé pour le MnO , est principalement associé à l'altération des épontes des zones minéralisées de la propriété St-Robert.

Roches sédimentaires de St-Robert

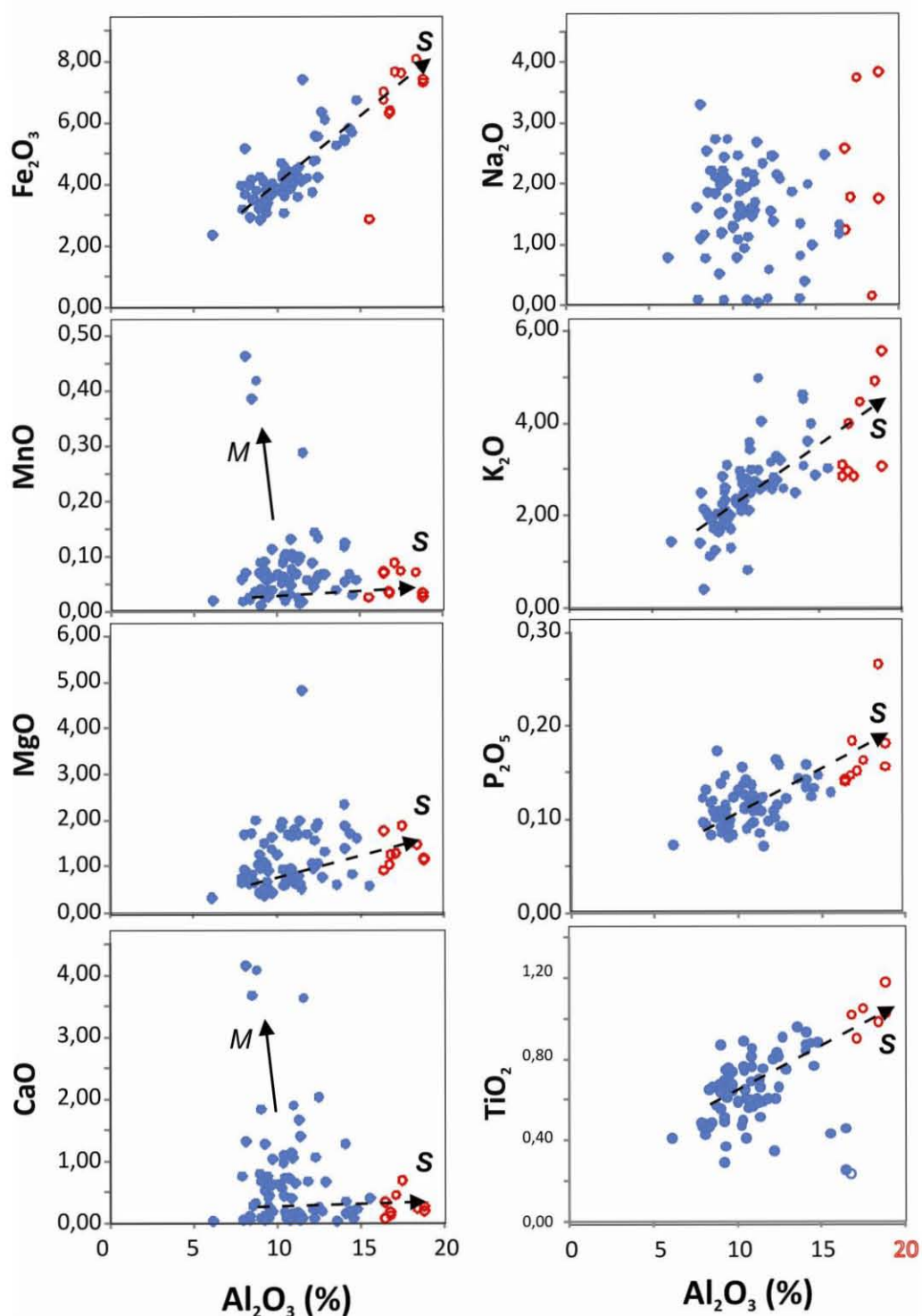


Figure 5.2 : Diagrammes de variation des abondances en éléments majeurs (oxydes %) en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert). Les cercles en rouge correspondent à des shales et ceux en bleu à des grès.

La figure 5.3 démontre que pour plusieurs des éléments traces, le contrôle sédimentologique sur la géochimie des roches sédimentaires est également dominant pour ce qui est des éléments comme le Th, U, La, Sm, Cs, Rb et V. Les concentrations en Ba et le Sr étant plus faiblement corrélées à l' Al_2O_3 reflètent probablement une mobilisation variable lors de la mise en place des minéralisations ou de l'activité hydrothermale le long des failles.

Contrairement aux actinides (U, Th), alcalins, alcalinoterreux (Rb, Cs, Ba) et terres rares légères (La, Sm), les métaux de base comme le Pb et le Zn montrent une dispersion perpendiculaire (vecteur M) à celle reliée aux processus sédimentaires (vecteur S). Ceci est également vrai pour les métaux associés au Pb comme l'Ag (galène argentifère) et au Zn comme le Cd (sphalérite). Les métaux suivants W-Mo-Bi-Sb-Sn sont également distribués le long d'un vecteur M s'éloignant du vecteur S. L'examen attentif de la figure 5.4 révèle que les vecteurs M prennent tous leur origine au niveau des valeurs en Al_2O_3 voisines de 10 %. Ceci indique clairement que les roches gréseuses sont celles les plus minéralisées de la propriété St-Robert. Cette dernière observation suggère un contrôle granulométrique et donc de perméabilité lors de la mise en place des minéralisations. En effet, la faible perméabilité des shales n'est pas favorable à la percolation et précipitation des fluides minéralisés.

Finalement, ce traitement préliminaire des données des roches sédimentaires permet de regrouper les éléments particulièrement affectés par la mise en place des minéralisations ou de l'activité hydrothermale associée aux failles. Pour l'étude sédimentologique de ces roches, un filtrage des données doit être effectué avant de discuter de la provenance de ces sédiments.

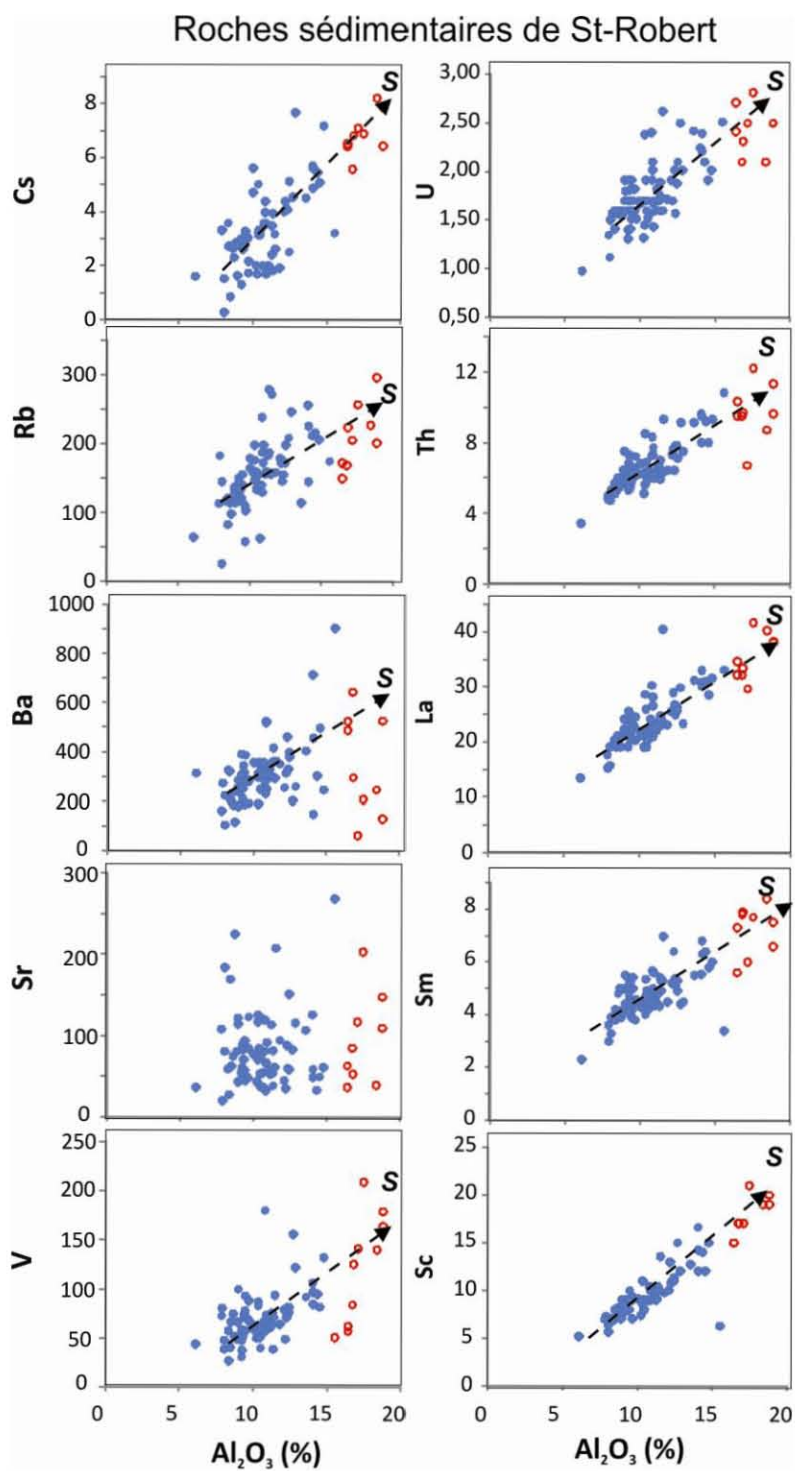


Figure 5.3 : Diagrammes de variation des abondances en éléments traces (ppm) en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert). Les cercles en rouge correspondent à des shales et ceux en bleu à des grès.

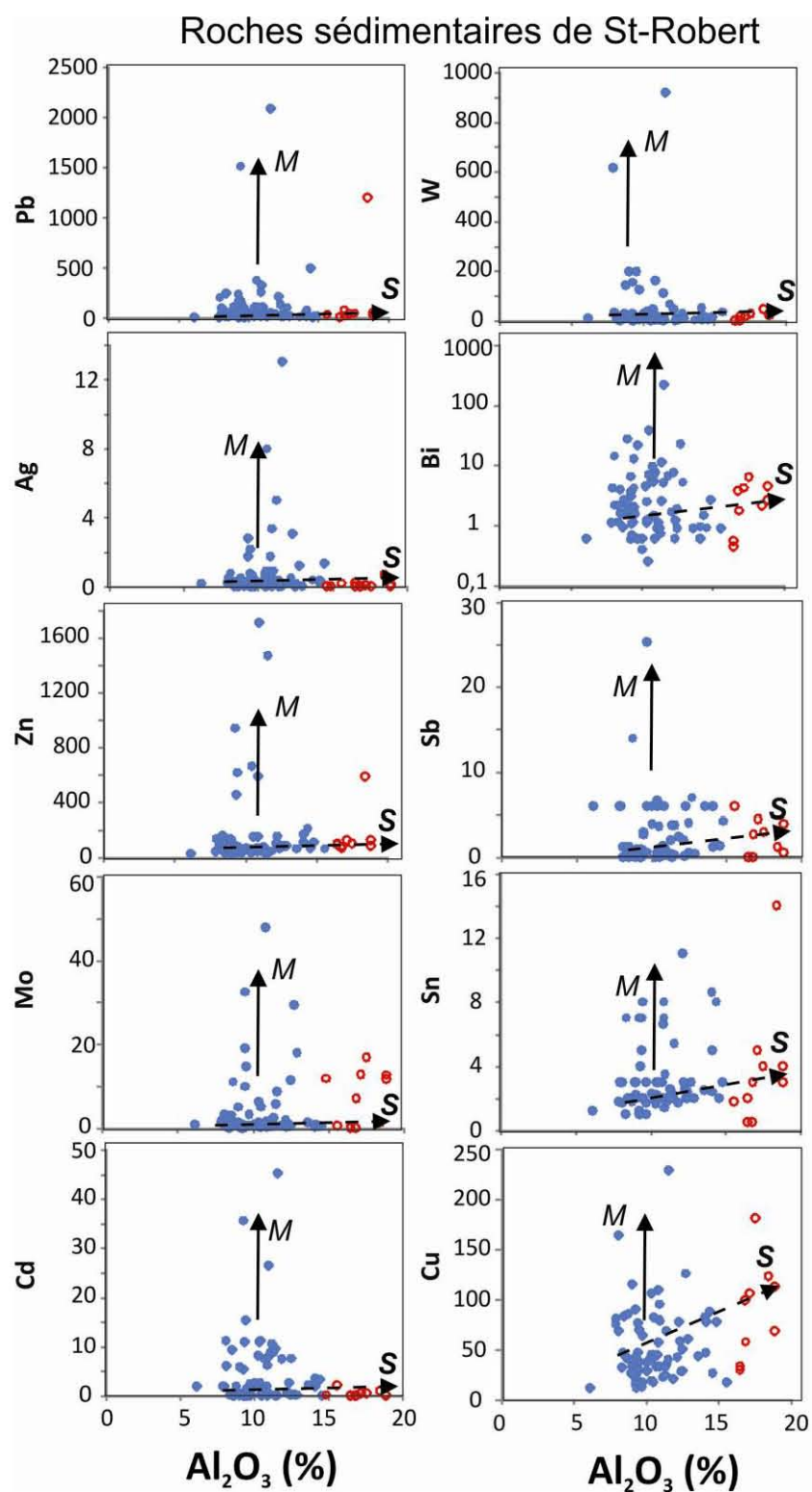


Figure 5.4 : Diagrammes de variation des abondances en métaux de base et autres métaux en fonction des concentrations en Al_2O_3 des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac (propriété St-Robert). Les cercles en rouge correspondent à des shales et ceux en bleu à des grès.

5.4.1 Altérations des roches sédimentaires

En géochimie, les processus d'altération hydrothermale et météorique sont souvent la cause d'erreurs d'interprétation sur l'origine probable des protolithes sédimentaires. En effet, certaines altérations peuvent influencer les concentrations en éléments majeurs et même parfois en éléments traces comme les terres rares. De ce fait, il est primordial d'évaluer l'impact de ces processus sur la mobilité relative des différents éléments majeurs et traces. Cette évaluation permet entre autres de sélectionner les échantillons les moins altérés et donc les plus susceptibles de nous renseigner sur l'origine des roches sédimentaires.

Au niveau lithogéochimique, les indicateurs de l'existence d'une altération peuvent se refléter par de fortes valeurs de la perte au feu (PAF > 4 %) et par le comportement relatif des différents éléments contenus dans la roche. En effet, bien souvent, les éléments majeurs tels que le Ca et le Na sont préférentiellement lessivés tandis que l'Al, l'Hf, le Nb, le Ta, le Ti, le Zr et les terres rares (plus particulièrement les terres rares lourdes) sont considérées comme relativement immobiles pendant l'altération (Nesbitt et Young, 1982). Dans le cas de chloritisation d'épentes, le Mg et le Fe peuvent s'enrichir considérablement. De la même façon, lors d'une altération potassique (comme une séricitisation) les concentrations en K, Rb et Cs peuvent augmenter d'une façon significative. Certains de ces éléments sont donc de bons indicateurs d'altérations hydrothermales. Cependant, dans certains milieux, il peut arriver que des éléments généralement considérés comme immobiles soient mobilisés par les processus d'altération.

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 3, les roches de la propriété de St-Robert présentent localement une carbonatation ainsi qu'une altération séricitique (ou argilitique). De plus Cattalani (1987) a également mis en évidence la présence d'une zone d'altération potassique au nord de la zone Centre. Ces altérations devraient se refléter géochimiquement dans les données lithogéochimiques des roches sédimentaires prélevées sur la propriété. Par exemple, la figure 5.5 signale des découplages élémentaires suggérant la présence d'un important processus de carbonatation. Cette carbonatation est mise en évidence sur la figure 5.5a par une diminution du rapport Ce/Sr et une augmentation du rapport CaO/MgO qui sont compatibles avec l'intensification de la carbonatation des roches sédimentaires situées en bordure des zones minéralisées ou dans les zones d'influence des failles recoupant les roches de la propriété. En supposant que le rapport Ce/Sr des roches sédimentaires de St-Robert était initialement semblable à celui de la croûte supérieure (UCC = 1,45; Rudnick et Gao, 2003), la figure 5.5a suggère que les roches sédimentaires devaient avoir un rapport CaO/MgO de l'ordre

de 0,50 avant les processus de carbonatation secondaire. Cette valeur suggère des conditions d'intempérisme chimique relativement élevées dans la région source de ces sédiments. Notez que dans les secteurs carbonatés de la propriété St-Robert, le rapport CaO/MgO des roches sédimentaires atteint des valeurs supérieures à 2. De plus, les figures 5.5b et 5.5c décrivent l'effet de la carbonatation sur la réduction des valeurs de l'indice d'altération d'Ishikawa et al. (1976). Normalement de hautes valeurs de cet indice reflètent la présence de roches très altérées. Dans le cas présent, l'ajout de CaO vient fausser l'interprétation, car le processus de carbonatation et l'ajout de CaO font diminuer la valeur de l'indice. L'indice d'altération d'Ishikawa (Ishikawa et al, 1976) s'obtient par l'équation :

$$AI = \frac{MgO + K_2O}{MgO + K_2O + CaO + Na_2O} \times 100$$

Les valeurs de cet indice sont présentées en annexe D6.

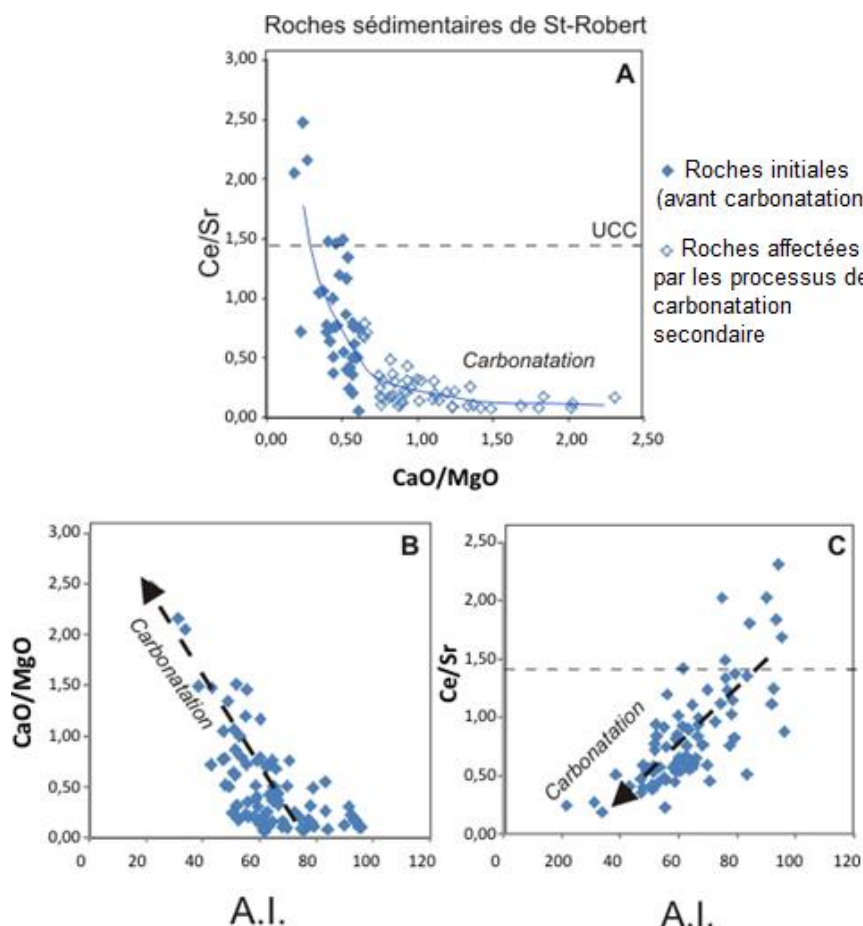


Figure 5.5 : A) Diagramme Ce/Sr vs CaO/MgO montrant l'effet de la carbonatation des roches sédimentaires sur les valeurs de ces rapports. UCC = croûte continentale supérieure. B et C) diminution des valeurs de l'indice d'altération d'Ishikawa (A.I.) et al. (1976) avec l'accroissement de la carbonatation des roches sédimentaires de St-Robert.

Les diagrammes de la figure suivante montrent que la carbonatation est étroitement associée à une altération potassique des épontes des zones minéralisées. La figure 5.6a indique en effet un fort fractionnement du rapport Rb/Cs reflétant une fixation préférentielle du Rb par rapport au Cs dans les minéraux argileux tels que la muscovite (séricite). Notez que la croûte continentale supérieure a un rapport Rb/Cs de 19 tandis que la croûte inférieure a un rapport de l'ordre de 35 (Hart et Reid, 1991). Dans le cas de St-Robert, les valeurs Rb/Cs relativement élevées observées dans les roches sédimentaires les moins altérées pourraient impliquer une provenance d'une source contenant une forte proportion de roches de haut grade métamorphique. Ces roches sont reconnues pour avoir un rapport Rb/Cs élevé (Hart et Reid, 1991). Dans le cas présent, cette source pourrait être constituée en tout ou en partie des roches gneissiques précambriennes du massif de Chain Lakes.

L'important fractionnement du rapport Ca/Sr observé dans les roches sédimentaires altérées (Fig. 5.6b) souligne que les roches sédimentaires ont été affectées par une carbonatation inorganique de relativement haute température. En effet, les travaux de Tang et al. (2008) démontrent que lorsque la température des fluides est élevée, une plus faible proportion de Sr^{2+} est incorporée dans la calcite. Ceci est compatible avec la nature hydrothermale des altérations observées à St-Robert.

En plus d'indiquer la présence d'altérations potassiques et carbonatées, la figure 5.6 révèle que ce sont les roches gréseuses qui subissent le plus les altérations hydrothermales sur la propriété St-Robert. Les roches plus riches en Al_2O_3 comme les shales ne montrent pas de fractionnements élémentaires pouvant suggérer une forte altération hydrothermale. Encore une fois, cette observation souligne l'importance de la porosité des roches sédimentaires dans les processus d'altérations et de minéralisations des roches de la propriété St-Robert.

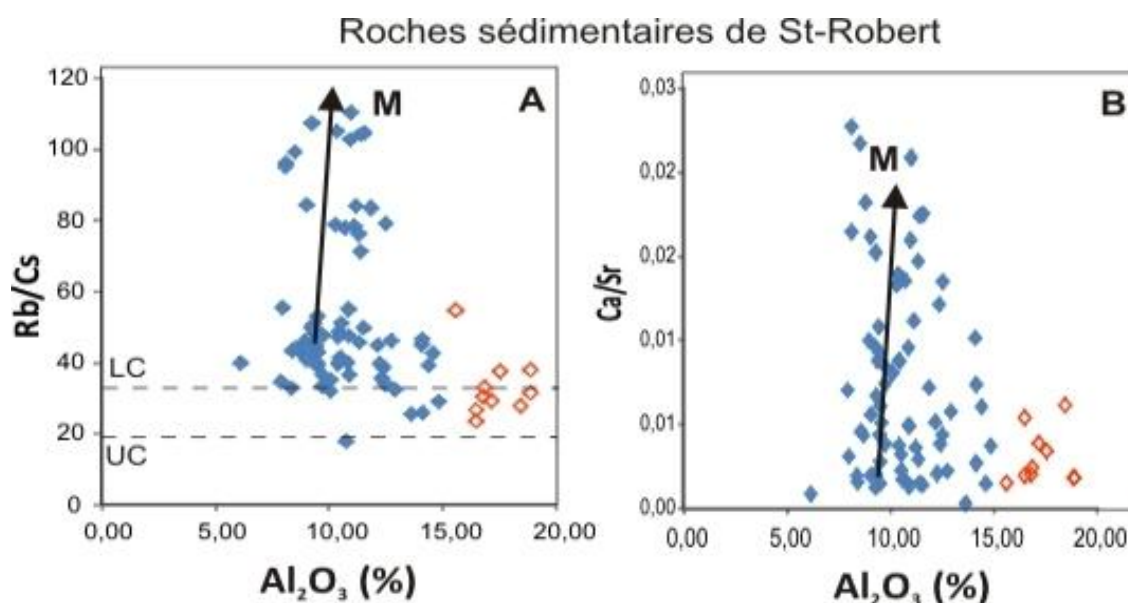


Figure 5.6 : A) Diagramme Rb/Cs vs Al_2O_3 montrant un vecteur d'altération potassique affectant préférentiellement les roches sédimentaires gréseuses. B) Fractionnement du rapport Ca/Sr suggérant une carbonatation secondaire et inorganique (haute température) des roches gréseuses de la propriété St-Robert. Les losanges orange correspondent aux shales de la propriété.

La méthode des isocones de Grant (1986) peut également nous aider à signaler la présence des altérations potassiques et carbonatées. Cette méthode permet d'identifier les éléments qui sont enrichis ou appauvris dans une roche altérée en les comparant avec des éléments qui sont restés immobiles durant le processus d'altération. Elle consiste à opposer les compositions chimiques du protolithe frais en abscisse à celles d'un échantillon altéré en ordonnée (Fig. 5.7). Selon Grant (1986), si des éléments sont immobiles lors du processus d'altération, ils seront distribués le long d'une droite passant par l'origine que l'on appelle « isocone ». Les éléments qui se trouvent au-dessus de la droite sont enrichis dans l'échantillon altéré tandis que ceux positionnés sous la droite sont appauvris dans la roche altérée par rapport à la roche fraîche.

De plus, la méthode des isocones de Grant (1986) permet d'estimer un bilan de masse des altérations. En effet, si la droite « isocone » a une pente égale à 1, cela indique que l'échantillon n'a pas subi de changement de masse. En revanche, si la pente est inférieure à 1, l'échantillon a subi un gain de masse et inversement pour une pente supérieure à 1 une perte de masse (Fig. 5.7).

Notez que l'utilisation de cette méthode repose sur une bonne sélection du protolithe. La sélection d'un mauvais protolithe peut entraîner l'obtention de mauvaises estimations de gains ou pertes des éléments. Par exemple, l'utilisation d'un protolithe argileux ou silteux pour étudier la mobilité des éléments dans un grès altéré va produire de fausses estimations pour plusieurs éléments comme l'Al, le Ti, le K, le Rb-Cs et les terres rares.

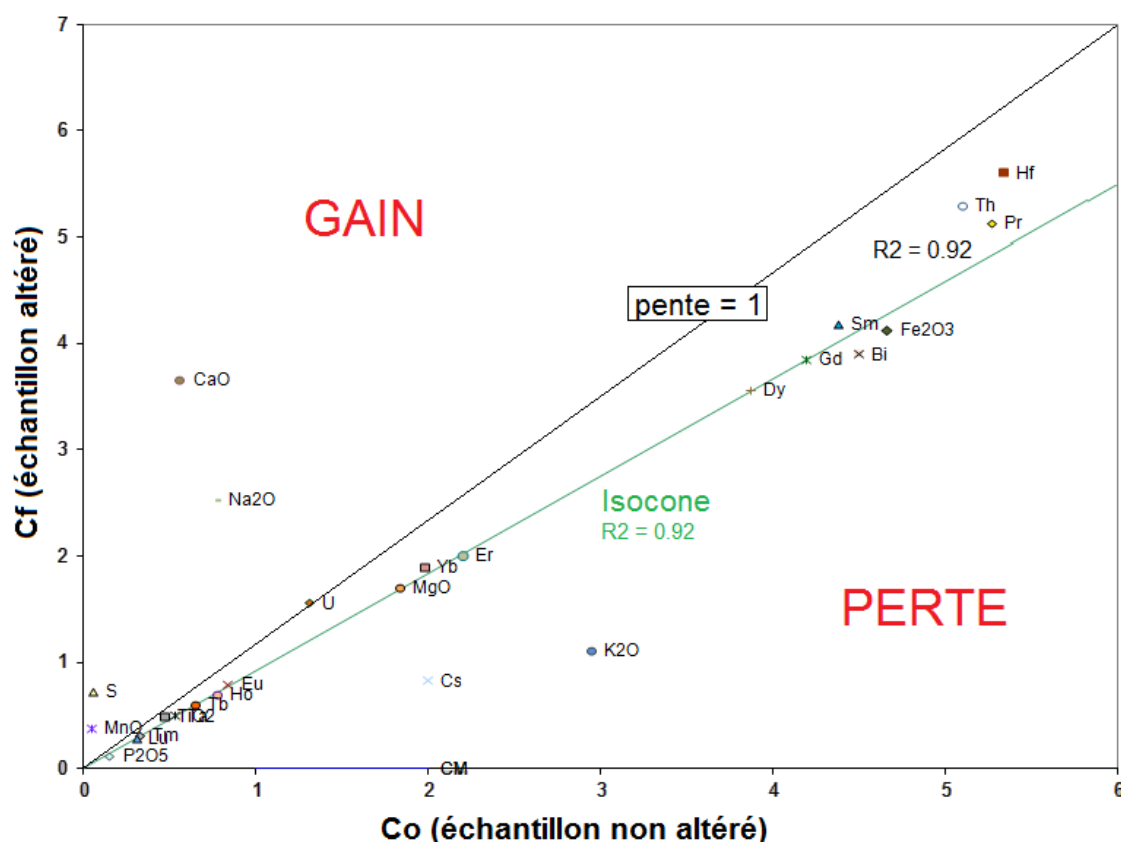


Figure 5.7 : Méthode des isocones de Grant (1986). La droite verte passant par l'origine correspond à l'isocone. Les éléments situés sur cette droite sont considérés comme immobiles.

Afin de déterminer quels éléments chimiques ont été influencés par l'altération, nous avons donc réalisé des calculs de gain et de perte selon la méthode de Grant sur les grès de la propriété St-Robert. Pour les zones minéralisées, nous avons choisi les échantillons des veines de quartz minéralisées échantillonnées à la scie à diamant en tant qu'échantillon altéré et un ou plusieurs échantillons peu altérés (PAF < 4 %) se situant dans le secteur de la zone minéralisée en tant que protolithe. Pour plus de fiabilité, nous avons calculé les moyennes des protolithes et des roches altérées de chaque zone afin de les comparer.

Notez toutefois que les protolithes ont été analysés à l'INRS et donc dissous à l'aide de la méthode de la fusion alcaline tandis que les roches altérées ont été analysées par ActLabs et dissous à l'aide d'acides. De ce fait, les erreurs analytiques sont assez élevées pour certains éléments des roches altérées (Annexe D4). Par exemple, le Zr et l'Hf qui sont normalement des éléments relativement immobiles sont systématiquement appauvris dans les roches altérées par rapport aux roches fraîches. Ceci s'explique par le fait que des minéraux accessoires comme les zircons n'ont pas été complètement dissous par la méthode de digestion multi-acides pour les échantillons altérés, tandis qu'ils ont été totalement dissous à l'aide de la fusion alcaline dans le cas des roches fraîches. De même, les épontes des veines minéralisées ont été pulvérisées à l'aide d'un broyeur à disque en ferrochrome. De ce fait, les gains et pertes de masse en Cr ne peuvent pas être pris en compte. La contamination résultante en Fe est néanmoins mineure étant donné la quantité initialement élevée de Fe de nos échantillons.

Comme nous l'avons vu précédemment, la concentration en Al_2O_3 dans les roches sédimentaires varie en fonction de leurs granulométries. De ce fait, nous ne pouvons pas vraiment prendre en compte les gains et pertes en Al_2O_3 dans les diagrammes suivant, car ils sont probablement engendrés par une différence de granulométrie entre le protolithe et la roche altérée choisis.

Tout d'abord, nous avons pu remarquer que la pente de l'isocone est inférieure à 1 pour tous les échantillons testés suggérant que l'altération hydrothermale semble causer un gain de masse pour les échantillons altérés. Ceci peut s'expliquer par le fait que les échantillons sélectionnés sont les épontes directes des veines de quartz minéralisées et que de ce fait, ils sont bien souvent minéralisés en sulfures. L'ajout de métaux tels que le Bi, Pb, V et le Zn (Fig. 5.8) tout comme l'enrichissement en Fe_2O_3 contribue au gain de masse.

Globalement, sur la figure 5.8, les échantillons altérés ont subi des gains importants en Fe_2O_3 , K_2O et un peu moins importants en MgO , TiO_2 et Na_2O . Le CaO semble être le seul élément majeur à être lessivé indiquant probablement le lessivage des plagioclases. Le gain en Na_2O observé dans les épontes des veines minéralisées suggère un processus d'albitisation. L'albitisation se traduit par des pertes en CaO et des gains en Na_2O dans les roches altérées. De plus, l'observation d'un lessivage en CaO au voisinage immédiat des veines est compatible avec la nature acide ($\text{pH} < 5$) des fluides hydrothermaux impliqués dans la mise en place des minéralisations de St-Robert (Cattalani, 1987). Au niveau des éléments traces, mis à part les métaux, les concentrations en Rb, Ba et en terres rares légères (La, Ce, Pr, Nd, Sm) ont augmenté pendant le processus d'altération.

L'augmentation des concentrations en Rb et K_2O est en accord avec nos observations précédentes et suggère un processus d'altération potassique expliquant ainsi la présence de feldspaths potassiques et de micas blancs (Fourcade et Allègre, 1981). L'augmentation des concentrations en MgO peut être causée par la formation d'argiles telles que la palygorskite et l'illite ou par la formation de biotite.

Le diagramme de la figure 5.8 montre que l'intensité du processus d'altération est plus importante dans la zone Nord que dans les autres zones minéralisées. Ceci pourrait s'expliquer par des conditions de plus hautes températures en se rapprochant de la masse intrusive.

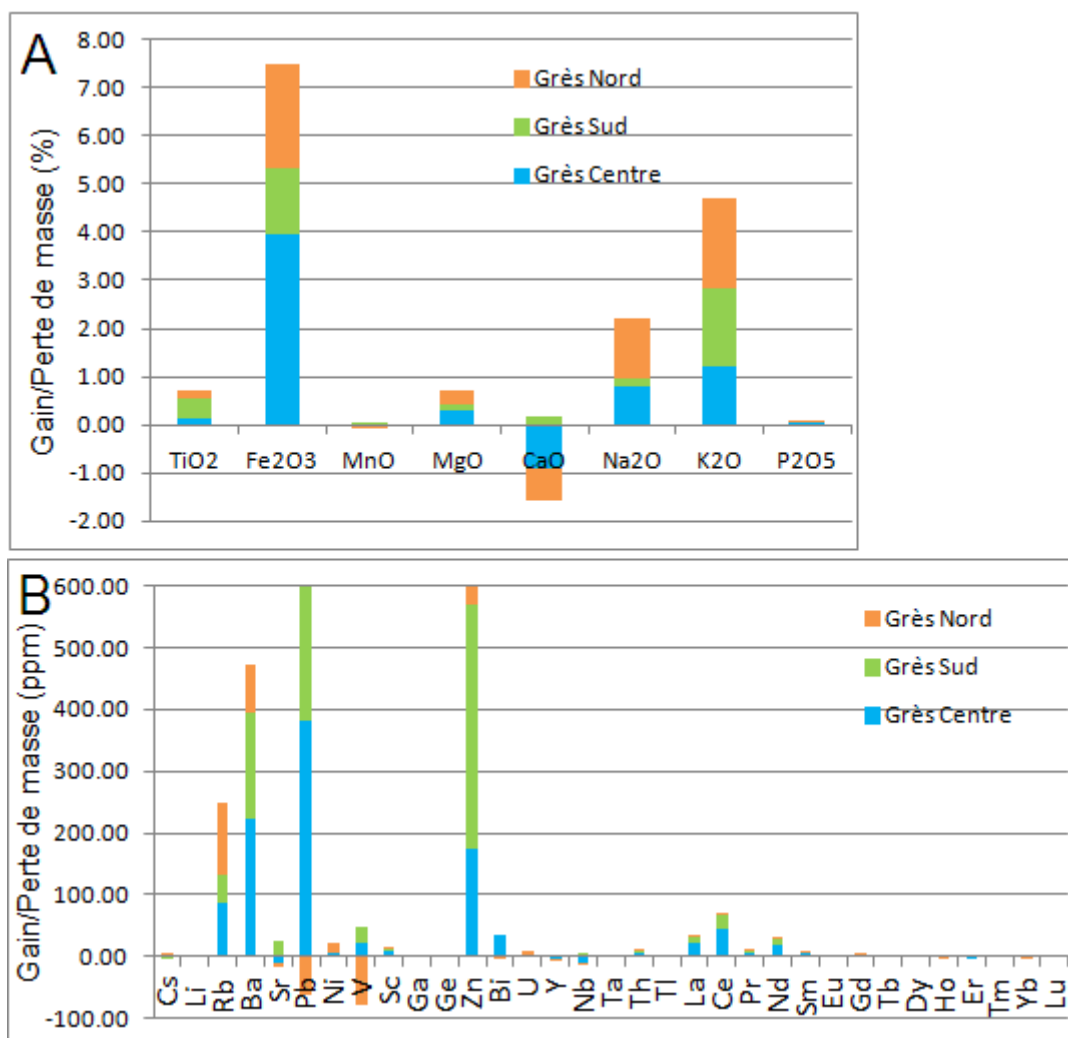


Figure 5.8 : Diagrammes de gain et de perte de masse pour les éléments majeurs (A) et traces (B) des roches sédimentaires gréseuses de la propriété St-Robert.

5.4.2 Caractérisation géochimique des échantillons de roches sédimentaires les moins altérées

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques géochimiques des échantillons de roches sédimentaires les moins altérés. Ces échantillons permettent de préciser la nature des roches sédimentaires observées sur la propriété St-Robert. Ces données sont comparées à celles de la rivière Clinton afin de bien mettre en évidence les contrastes des environnements sédimentaires à l'intérieur de la Formation de Frontenac.

Les figures 5.9 et 5.10 présentent des diagrammes de classification des roches sédimentaires basés sur leurs compositions en éléments majeurs. Sur ces diagrammes, nous avons rapporté uniquement les échantillons prélevés dans des secteurs non minéralisés.

Compte tenu de la mauvaise préservation des shales sur le terrain (grande friabilité), les échantillons analysés sont surtout constitués de grès, ce qui explique que la population de shales est sous-représentée sur ces figures.

Sur la figure 5.9, présentant le logarithme du rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$ en fonction du logarithme du rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Herron, 1988), les roches sédimentaires de la propriété de St-Robert se situent dans le champ des wackes et des litharénites tandis que les roches sédimentaires ferromanganésifères associées aux métavolcanites de la rivière Clinton (analyses de Chevé, 1990) se situent essentiellement dans le champ des shales et des shales enrichis en fer. Pour les roches sédimentaires de la rivière Clinton, la nature argileuse et riche en fer des sédiments reflète probablement un environnement marin distal et ultra profond qui de surcroît est enrichi en fer par la présence d'hydrothermalisme associé à la mise en place de gîtes de sulfures massifs volcanogènes dans ce secteur (Chevé, 1990).

La présence de litharénites pourrait suggérer une sédimentation dans un milieu marin proche d'un continent. La présence d'échantillons tombant dans le champ des wackes pourrait s'expliquer par la présence de siltstones légèrement argileux sur la propriété St-Robert. En effet, la présence d'une proportion plus importante de minéraux argileux peut faire passer la composition de litharénites à wackes.

Tout comme la figure 5.9, la figure 5.10 suggère que les roches sédimentaires gréseuses de la propriété de St-Robert sont dominées par des litharénites. À l'opposé, les roches sédimentaires de la rivière Clinton (analysées par Chevé, 1990) se situent dans le champ des grauwackes. Ces roches sédimentaires sont normalement associées aux environnements volcaniques.

Dans l'ensemble, ces observations sont concordantes avec ce que nous avons observé sur le terrain et en lame mince (Fig. 5.11).

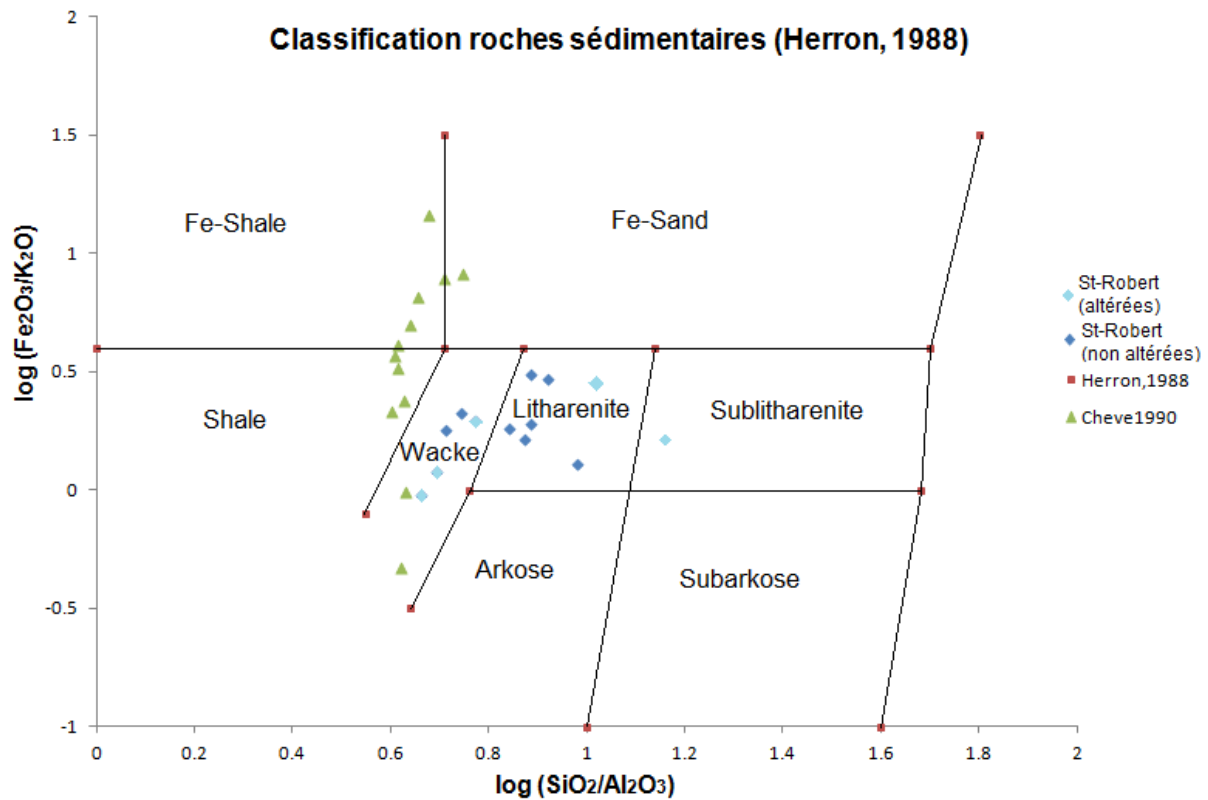


Figure 5.9 : Classification des grès terrigènes et des shales d'après Herron (1988). Les triangles verts représentent les roches sédimentaires ferromanganésifères associées aux métavolcanites de la rivière Clinton (Chevé, 1990) et les losanges bleus à celles de St-Robert. Notez que le Fe_2O_3 correspond au fer total analysé.

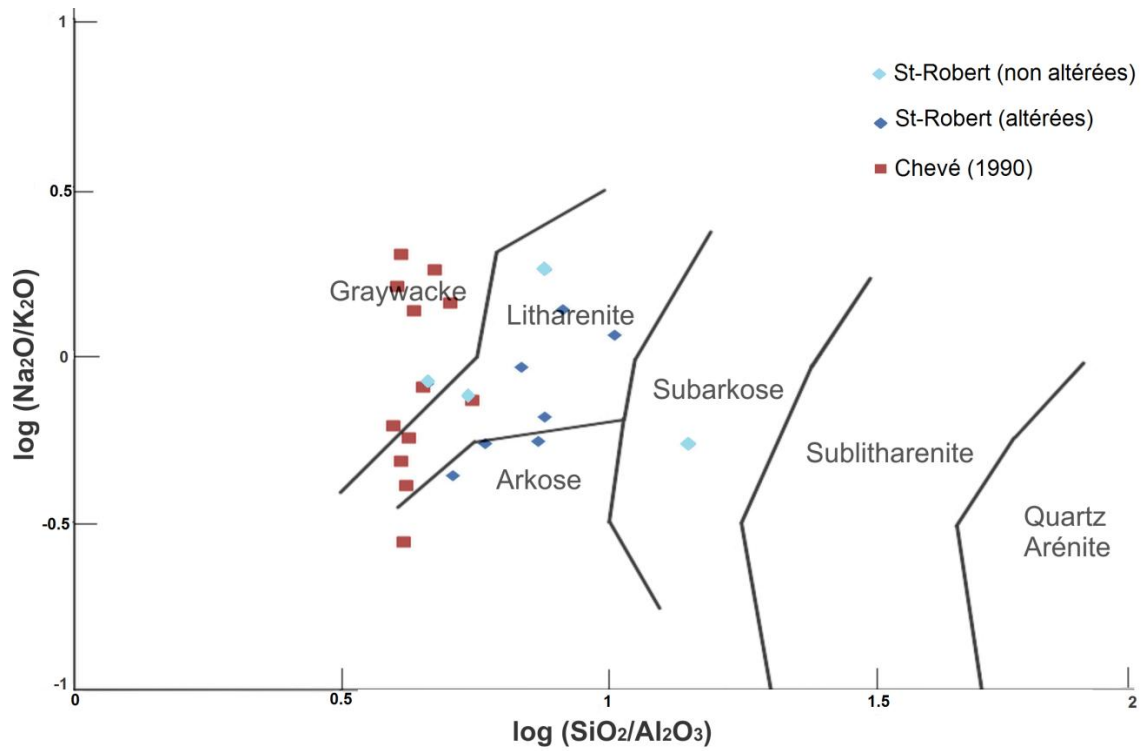


Figure 5.10 : Classification des grès terrigènes d'après Herron (1988). Les carrés rouges représentent les résultats d'analyses faites par Chevé (1990), les losanges bleus, ceux de St-Robert.

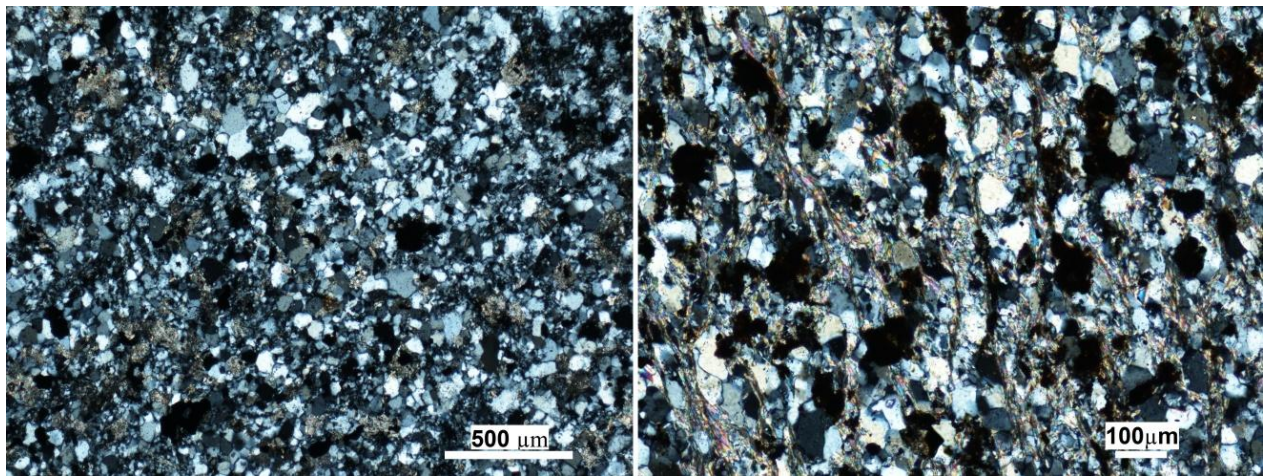


Figure 5.11 : Photographies des échantillons de grès SR07 (à gauche) et SR09 (à droite) en lumière polarisée.

5.4.3 Contexte tectonique de déposition des roches sédimentaires

Des indications permettant d'estimer l'environnement tectonique probable de mise en place des roches sédimentaires peuvent être obtenues grâce à l'utilisation de diagrammes de discrimination spécialement adaptés à l'étude des roches sédimentaires détritiques (ex. Bathia, 1983; Roser et Korsch, 1988). Dans le cas présent, nous n'utiliserons que les analyses des échantillons les moins altérés pour préciser l'environnement probable de déposition des roches sédimentaires de St-Robert. Plus indirectement, des indications peuvent aussi être obtenues à partir de diagrammes multiéléments ou de spectres de terres rares. Cependant, l'interprétation de ces spectres doit être faite avec précaution, car plusieurs éléments pris en compte peuvent avoir subi un lessivage ou un enrichissement par des processus d'altérations secondaires.

5.4.3.1 *Éléments majeurs*

Pour les éléments majeurs, plusieurs diagrammes discriminants pour les roches sédimentaires clastiques ont été proposés. Le diagramme des fonctions discriminantes de Bhatia (1983) prend en compte un grand nombre d'éléments majeurs et permet une séparation des environnements de marge passive, de marge continentale active, d'arc océanique et d'arc continental (Fig. 5.12d).

Ces fonctions s'expriment comme ceci :

$$\begin{aligned} \mathbf{Df1} &= - 0,0447 \text{ SiO}_2 - 0,972 \text{ TiO}_2 + 0,008 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,267 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0,208 \text{ FeO} - 3,082 \\ &\text{MnO} + 0,140 \text{ MgO} + 0,195 \text{ CaO} + 0,719 \text{ Na}_2\text{O} - 0,032 \text{ K}_2\text{O} + 7,510 \text{ P}_2\text{O}_5 + 0,303 \\ \mathbf{Df2} &= - 0,421 \text{ SiO}_2 + 1,988 \text{ TiO}_2 - 0,526 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,551 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 1,610 \text{ FeO} + 2,720 \text{ MnO} \\ &+ 0,881 \text{ MgO} - 0,907 \text{ CaO} - 0,177 \text{ Na}_2\text{O} - 1,840 \text{ K}_2\text{O} + 7,244 \text{ P}_2\text{O}_5 + 43,57 \end{aligned}$$

D'autres diagrammes utilisant le TiO_2 , le Fe_2O_3 , le MgO , le K_2O , le Na_2O , l' Al_2O_3 et le SiO_2 (Fig. 5.12a, 5.12b et 5.12c) peuvent aussi être utilisés pour discriminer l'environnement probable de sédimentation.

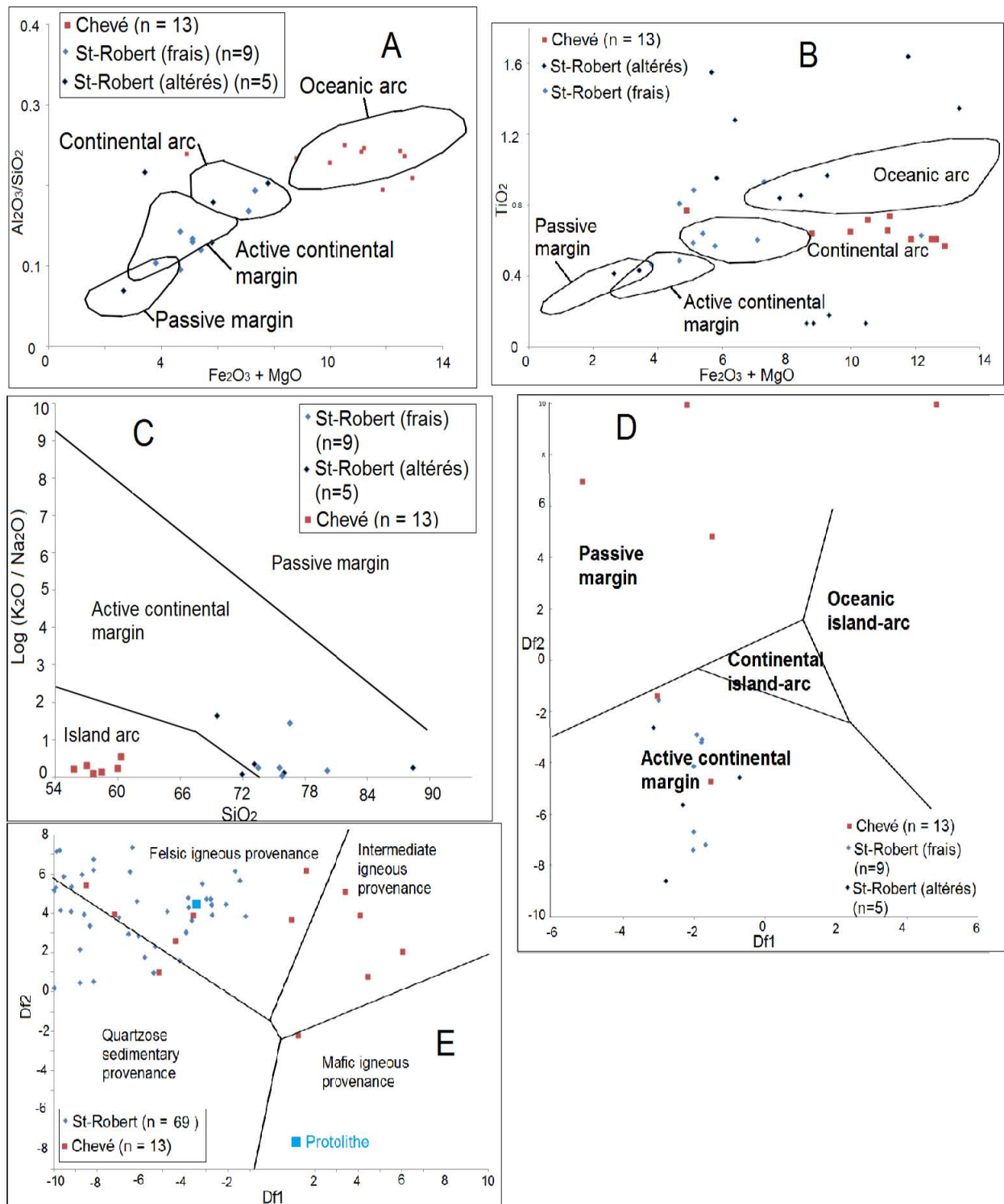
De plus, Roser et Korsch (1988) ont également créé un diagramme discriminant pour déterminer la provenance des sédiments à l'aide des éléments majeurs (fig. 5.12e).

Leurs fonctions discriminantes s'expriment comme ceci :

$$\mathbf{Df1} = - 1,773 \text{ TiO}_2 + 0,607 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,76 \text{ Fe}_2\text{O}_{3\text{total}} - 1,5 \text{ MgO} + 0,616 \text{ CaO} + 0,509 \text{ Na}_2\text{O} - 1,224 \text{ K}_2\text{O} - 9,09$$

$$\mathbf{Df2} = 0,445 \text{ TiO}_2 + 0,07 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,25 \text{ Fe}_2\text{O}_{3\text{total}} - 1,142 \text{ MgO} + 0,438 \text{ CaO} + 1,475 \text{ Na}_2\text{O} + 1,426 \text{ K}_2\text{O} - 6,861$$

Globalement, la projection de la composition en éléments majeurs des roches sédimentaires les moins altérées de St-Robert suggère des environnements de marge continentale active ou d'arc continental (Fig.5.12a à d). Quoique la proportion d'échantillons tombant dans le domaine de marge continental active soit dominante, quelques échantillons tombent dans le champ d'arc continental. Ces échantillons, plus riches en Al_2O_3 et TiO_2 , reflètent la présence probable de grès fins ou siltstones plus argileux ce qui se traduit par une fausse signature lorsque projetés dans des diagrammes de discrimination calibrés pour des grès. De plus, sur ces figures nous avons ajouté des échantillons de roches sédimentaires altérées pour évaluer l'effet possible d'un mauvais filtrage des données. L'effet le plus visible en est un de dispersion des échantillons dans des domaines tectoniques variés. Ces mêmes diagrammes suggèrent la présence d'un arc océanique pour les roches sédimentaires ferromanganeuses associées aux métavolcanites de la rivière Clinton (données de Chevé, 1990). Bien que la présence d'un arc volcanique soit possible lors de la sédimentation des shales de la rivière Clinton, la source des sédiments pourrait aussi être des roches volcaniques mafiques associées à une marge continentale volcanique active. Notez que lors de la conception de ces diagrammes de discrimination tectonique, les environnements de marges volcaniques actives n'étaient pas considérés dans les études sédimentologiques. Conceptuellement, l'érosion de ces terrains devrait produire des sédiments chimiquement similaires à des volcanites d'arc en raison du mélange de particules de roches volcaniques mafiques (tholéiites) et de sédiments dérivés du continent. De plus, le diagramme de Roser et Korsch (1988) (Fig. 5.12e) indique une provenance sédimentaire et ignée felsique pour les roches sédimentaires de la propriété de St-Robert. Ces roches sources pourraient correspondre à celles du massif de Chain Lakes comme l'a suggéré l'étude pétrographique de Lafrance (1995). Les roches sédimentaires associées aux métavolcanites de la rivière Clinton semblent quant à elles provenir d'une source ignée intermédiaire pouvant correspondre aux métavolcanites elles-mêmes et d'une source ignée felsique. Cette observation serait un argument en faveur de l'hypothèse selon laquelle les volcanites de la rivière Clinton seraient plus vieilles que les roches sédimentaires de la Formation de Frontenac présentes dans la région de Saint-Robert Bellarmin.



**Figure 5.12 : A) et B) : Diagrammes discriminants pour les gr s d'après Bhatia (1983).
 C) : Diagrammes discriminants d'environnement tectonique pour les roches sédimentaires détritiques d'après Roser et Korsch (1986).
 D) : Diagramme discriminant pour les gr s d'après Bhatia (1983).
 E) : Diagramme discriminant pour la provenance des roches détritiques d'après Roser et Korsch (1988).**

5.4.3.2 Éléments traces

Les éléments traces peuvent également aider à préciser l'environnement de déposition des roches sédimentaires. Par exemple, Bhatia (1983) a proposé l'utilisation de deux diagrammes (Th-Sc-Zr/10 et La-Th-Sc) permettant de discriminer certains environnements tectoniques (Fig. 5.13). Les diagrammes ternaires Th-Sc-Zr/10 et La-Th-Sc (Bhatia et Crook, 1986) doivent être utilisés avec précaution, car ils ont été créés pour l'identification de l'environnement de mise en place de grauweekes. Ces roches sont caractérisées par une matrice abondante et la présence de fragments anguleux témoignant d'un transport modéré par rapport à la source.

Dans le cas présent, nous avons utilisé ces diagrammes à titre indicatif seulement, car les roches sédimentaires de St-Robert ont une composition de type litharénite.

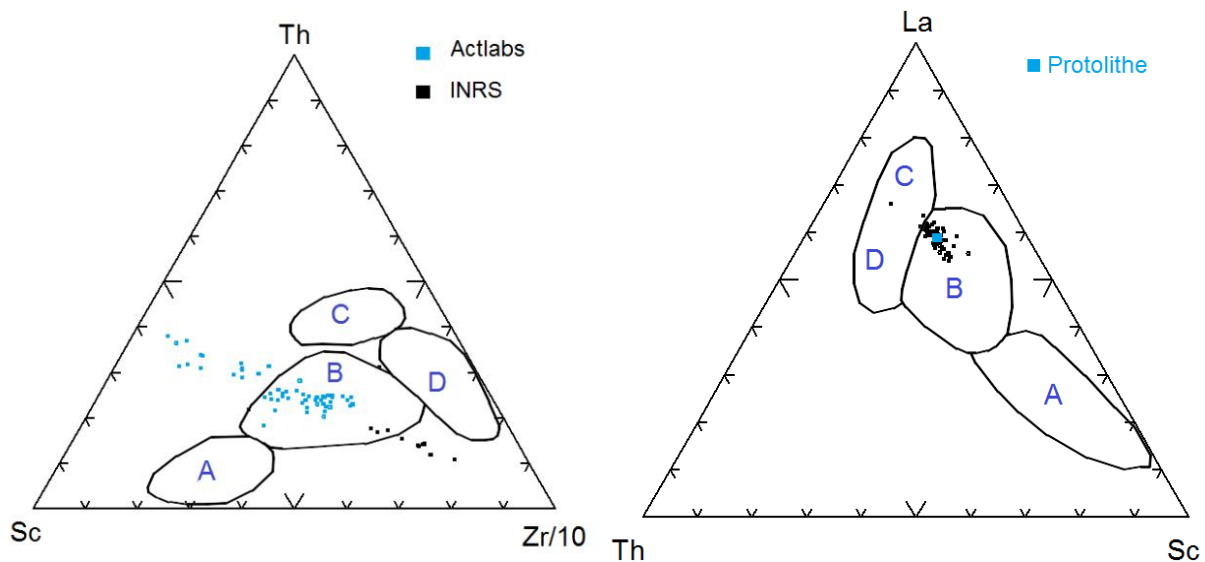


Figure 5.13 : Diagrammes ternaires de discrimination pour les grauweekes d'après Bhatia et Crook (1986). Les champs représentent les environnements : A : d'arcs insulaires océaniques, B : d'arcs insulaires continentaux, C : de marges actives continentales et D : de marges passives.

Le diagramme Th-Sc-Zr/10 montre une grande dispersion s'alignant sur le pôle du Zr. Plusieurs échantillons tombent à l'extérieur des champs de Bhatia et Crook (1986) (Fig. 5.13). Après vérification, les échantillons analysés par ActLabs sont ceux montrant une grande dispersion pour le Zr. En fonction des résultats d'analyses de standards internationaux, il semble que le Zr ait été sous-dosé lors des analyses chez ActLabs (annexe D4). Ce sous-dosage est la conséquence de la méthode de dissolution multi-acides qui ne dissout pas complètement les zircons. Ces données ne peuvent donc pas être utilisées pour inférer un environnement tectonique.

D'un autre côté, les échantillons analysés par l'INRS tombent de part et autre du champ d'arcs insulaires continentaux du diagramme Th-Sc-Zr/10. Cette variabilité pourrait s'expliquer par une plus haute maturation texturale et minéralogique des grès de St-Robert. Cette maturation pourrait expliquer entre autres des concentrations plus élevées en Zr (accumulation de zircons, minéraux lourds) et des concentrations plus élevées en SiO₂ dans les roches sédimentaires de St-Robert.

Le diagramme La-Th-Sc montre une plus faible dispersion des données. Ces dernières tombent dans les champs d'arcs insulaires continentaux ou de marges continentales (actives ou passives).

5.4.3.3 Terres rares

Certains chercheurs utilisent les spectres de terres rares afin de préciser la nature des matériaux présents dans les régions sources des sédiments. Dans les sédiments clastiques, les terres rares reflètent généralement la composition de la source des sédiments. En effet, ces éléments sont relativement insolubles et présents en très faibles concentrations dans la fraction dissoute des eaux des rivières et de la mer. De ce fait, la composition en terres rares d'une roche sédimentaire devrait quasiment refléter celle de sa source (McLennan, 1989).

Dans cette étude, les spectres de terres rares des roches sédimentaires de St-Robert ont été normalisés aux abondances des chondrites de type C1 (Sun et McDonough, 1989) (Fig. 5.14). Ces valeurs sont présentées à l'annexe D5. Pour l'étude des éléments traces, nous ne pouvons pas utiliser les données de Chevé (1990), car les terres rares n'ont pas été analys  es.

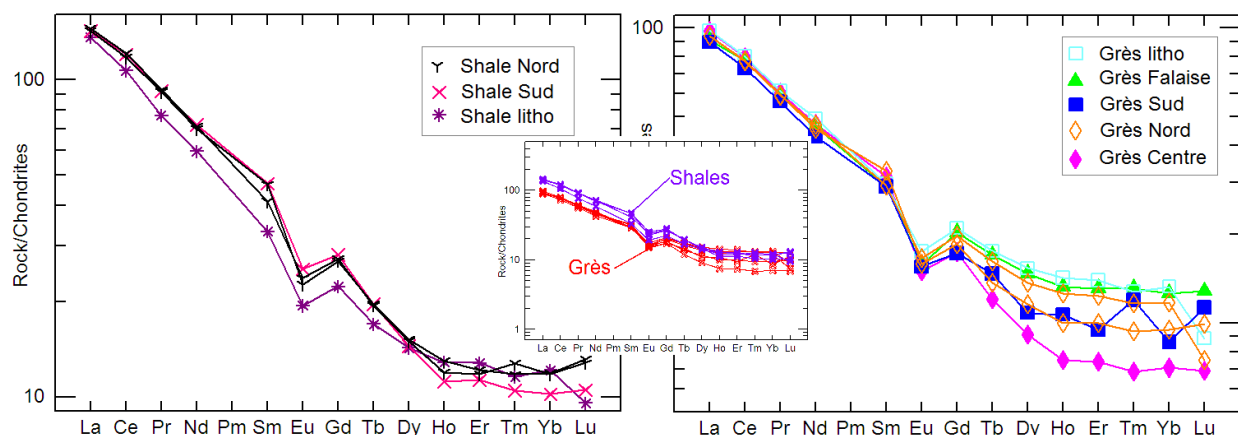


Figure 5.14 : Spectres des terres rares normalis  es aux valeurs de Sun et McDonough (1989) pour les roches sédimentaires de type grès et shales de la propriété de St-Robert. (n = 69)

Globalement, les spectres de terres rares présentés à la figure 5.14 montrent que les shales sont enrichis en terres rares légères (La à Sm) par rapport aux grès. À l'opposé les terres rares lourdes (de Gd à Lu) montrent des concentrations relativement semblables. L'ensemble des roches sédimentaires montre une anomalie négative en europium typique de sédiments dérivés de l'érosion d'une source dominée par la présence de roches ignées felsiques. Selon McLennan (1989), ce type de signature s'expliquerait par une différenciation intracrustale associée à la production de roches granitiques qui va appauvrir la croûte continentale supérieure en Eu et enrichir la croûte inférieure en Eu (restites anatexiques). L'enrichissement en terres rares légères des shales pourrait refléter une plus grande incorporation de ces dernières dans les phases argileuses lors de l'intempérisme chimique des régions sources.

5.4.4 Indices d'intempérisme chimique (*chemical weathering*)

Dans l'ensemble, l'évaluation des processus d'altération pouvant avoir affecté les roches sédimentaires est plus complexe que pour des roches ignées, car par définition des processus météoriques sont également actifs dans les régions sources des sédiments (*chemical weathering*). Ces processus induisent un fractionnement des éléments comme le lessivage du CaO (Sr) par rapport au MgO et K₂O (Rb, Cs) qui sont relativement stables dans les minéraux argileux des sols. En l'absence de processus hydrothermaux secondaires, la composition en éléments majeurs des roches sédimentaires permet le calcul d'indices de météorisation chimique comme le CIA (*Chemical Index of Alteration*) ou le CIW (*Chemical Index of Weathering*). Ces indices sont utiles afin de déterminer l'importance des processus climatiques d'intempérisme chimique dans les régions sources des sédiments (Nesbitt et Young, 1984).

La majorité des indices sont élaborés à partir des gains et pertes d'éléments à l'aide de la relation suivante (Piercey, 2011):

$$Index\ d'altération = \frac{\text{éléments enrichis}}{\text{éléments enrichis} + \text{éléments lessivés}}$$

Ils sont donc susceptibles de changer en fonction des environnements et des types de gisement.

L'index d'altération chimique CIA (Nesbitt & Young 1984) est un exemple et s'exprime de la manière suivante :

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100$$

L'index d'altération CIW (Harnois 1988) peut également nous aider à déterminer le degré d'altération. Il est défini par l'équation ci-dessous :

$$CIW = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO * + Na_2O} \times 100$$

Ces deux indices peuvent être utilisés sur la propriété de St-Robert pour évaluer l'importance des processus météoriques dans les régions sources des roches sédimentaires. Pour ce faire, il faut d'abord éliminer les échantillons proximaux aux veines et failles. Dans ces équations, CaO* correspond au CaO contenu uniquement dans les minéraux silicatés, car la carbonatation peut influencer considérablement les valeurs des indices d'altérations. De plus, Al₂O₃, CaO, K₂O et Na₂O sont exprimés en proportion molaire. Le pourcentage molaire s'obtient en trois étapes : (a) la division du pourcentage poids de l'oxyde par le poids moléculaire de l'oxyde qui donne la proportion moléculaire, (b) la division de la proportion moléculaire par la somme des proportions moléculaires de l'échantillon. On obtient ensuite la fraction molaire que l'on multiplie par 100 pour obtenir le pourcentage molaire (c).

Pour calculer le CaO*, nous avons utilisé la méthode proposée par McLennan (1993) qui suggère que le CaO* peut être estimé à partir du contenu en Na₂O. Ce chercheur suggère que si la concentration en CaO molaire est inférieure à celle de Na₂O, alors nous pouvons faire l'approximation que CaO* = CaO. Inversement, si la concentration en CaO molaire est supérieure à celle de Na₂O, alors CaO* = Na₂O. Normalement, plus les valeurs des indices CIW et CIA sont élevées, plus le degré d'altération météorique était élevé dans la région source des sédiments.

Les valeurs de ces index pour les roches de la propriété St-Robert sont présentées en annexe D6.

Compte tenu que le CaO est mobile dans les roches sédimentaires de St-Robert, nous ne pouvons évaluer avec certitude les valeurs des indices de météorisation de la région source des sédiments. Toutefois, comme le montrent les valeurs de CIA pour les échantillons à faible rapport CaO/MgO (Fig. 5.15), nous pouvons estimer que les roches sédimentaires de St-Robert avaient des valeurs de CIA de l'ordre de 70 %. Ces valeurs peuvent être considérées comme intermédiaires en intensité et semblables à celles observées dans d'autres secteurs des Appalaches du Québec. Notez que les fortes corrélations entre le K₂O et Al₂O₃ et le TiO₂ et Al₂O₃ suggèrent une intensité de météorisation chimique relativement importante dans la région source des sédiments.

La forte corrélation entre K_2O et Al_2O_3 dans les roches sédimentaires de St-Robert suggère la présence d'illite dans la source sédimentaire. Ceci est compatible avec les valeurs de CIA estimées à partir de la figure 5.15.

Les fortes corrélations entre K et Rb et K et Cs dans les roches sédimentaires de St-Robert suggèrent de plus la présence de minéraux potassiques dans la région source sédimentaire. La présence d'une source riche en minéraux potassiques est compatible avec une provenance de matériaux continentaux.

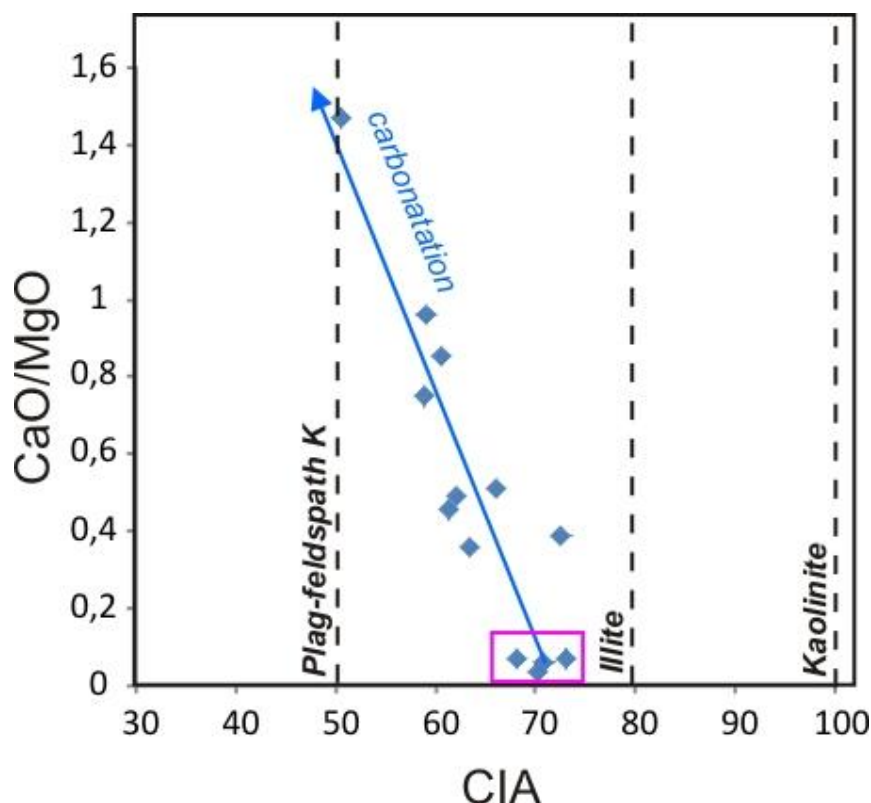


Figure 5.15 : Diagramme du rapport CaO/MgO , représentatif de la carbonatation secondaire, en fonction de l'indice d'altération chimique ($CIA = 100 \cdot Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ mol) de Nesbitt et Young (1982). L'indice CIA est un indicateur du degré d'altération chimique des roches de la région source des sédiments. Les valeurs élevées (>90) indiquent un fort degré de weathering; les valeurs de 50 % et moins suggèrent que les roches sources n'ont pas subi de weathering, mais le lecteur notera que ces valeurs peuvent être faussées par la carbonatation.

Afin de caractériser l'importance de l'altération météorique sur la propriété, nous avons également utilisé la méthode des isocones de Grant (1986). Pour ce faire, nous avons séparé les croûtes d'altérations météoriques et les cœurs non altérés des échantillons que nous avons prélevés sur l'affleurement principal de la zone Centre pour les analyser séparément (Fig. 3.6).

La présence de ces croûtes d'altérations météoriques est d'ailleurs en accord avec une érosion mécanique limitée reliée à la faible dispersion glaciaire que nous avons invoquée dans l'étude pédogéochimique. En effet, au Québec, la majorité des roches ont perdu leurs enveloppes d'altérations météoriques à cause de l'effet décapant des glaciers.

Nous avons pu remarquer que la pente de l'isocone avoisine 1 pour l'altération météorique. De ce fait, nous pouvons en déduire que cette altération n'engendre pas de gain ni de perte de masse sur l'échantillon en lui-même. Notez également sur la figure 5.16 que les gains et les pertes en éléments majeurs et traces ne sont pas importants.

De plus, dans le cas de la zone Centre de St-Robert, l'altération météorique se présente sous la forme d'un lessivage en CaO, MgO et Sr et un gain en K₂O, Fe₂O₃, Rb et Ba. En revanche, elle n'agit pas sur les terres rares. La diminution des concentrations en CaO et Sr couplée à l'augmentation des concentrations en Rb et K₂O suggère que l'altération météorique remplacerait l'anorthite par des micas blancs lors de l'altération. De plus, la diminution de la concentration en MgO peut suggérer la transformation des biotites en chlorites. Enfin, l'augmentation en Fe₂O₃ peut représenter la formation d'hématite. Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) corroborent cette hypothèse.

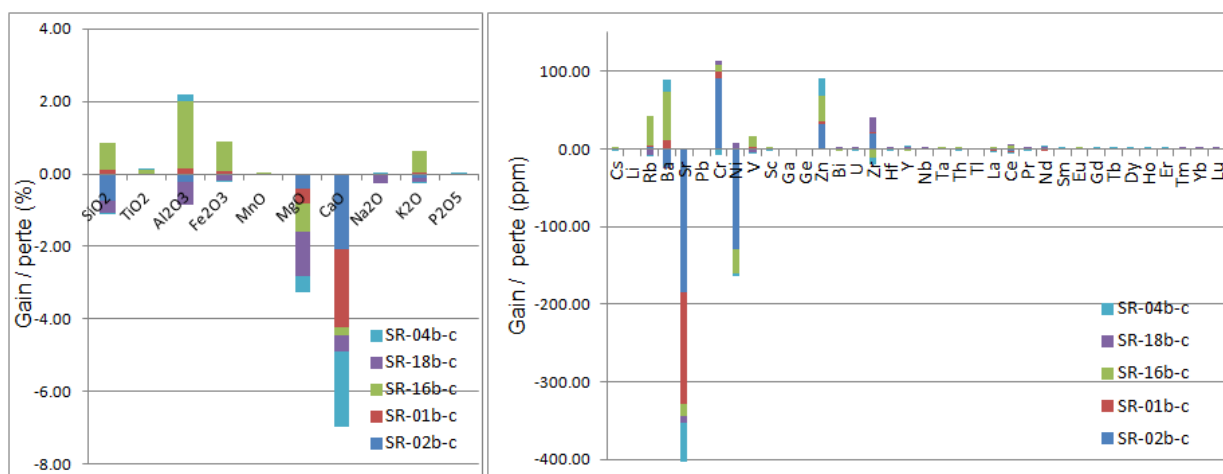


Figure 5.16 : Diagrammes de gain et perte de masse issus de la méthode des isocones de Grant pour les enveloppes d'altération météorique des roches sédimentaires de la propriété St-Robert.

5.5 Roches ignées

Les roches ignées felsiques constituent un groupe lithologique particulièrement important sur la propriété St-Robert en raison du rôle du magmatisme felsique dans la mise en place des minéralisations. Ces roches affleurent sous la forme de dykes décimétriques à métriques parallèles au grain tectonique régional. L'intrusif de St-Robert constitue probablement la plus importante masse de roches felsiques de la propriété. Cette masse est toutefois recouverte par des roches sédimentaires de la Formation de Frontenac. La composition de cette dernière doit être déduite à partir de celles des nombreux dykes recoupant les roches sédimentaires et aussi à partir des données gravimétriques montrant que cette masse est nécessairement felsique (densité voisine de celle des roches sédimentaires).

5.5.1 Variabilité géochimique des roches intrusives

Cattalani (1987) a étudié les éléments majeurs de roches intrusives de la propriété St-Robert et a déterminé à l'aide du diagramme de Streickeisen (1976) qu'elles correspondent à des granodiorites. Certains échantillons tombant dans le champ des granites sont interprétés comme étant des roches altérées. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons analysé de nouveaux échantillons et compilé les anciennes données afin de vérifier cette hypothèse.

Nous avons tout d'abord pu observer dans les différents diagrammes réalisés, un regroupement des échantillons en trois populations distinctes. À partir des spectres des terres rares, nous avons pu déterminer que ces regroupements reflètent en réalité la présence de trois groupes de roches felsiques distinctes (Fig. 5.17). Les contrastes observés dans ces éléments traces relativement insolubles ne peuvent s'expliquer par une simple altération. Pour plus de facilité, nous avons nommé ces groupes de A à C. La répartition des échantillons dans chaque groupe est présentée dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Répartition des échantillons dans les différents groupes d'affinités chimiques.

Groupe A	Groupe B	Groupe C
CM11	CM14	GC54
CM13	GC06	GC51
GC08	GC10	FG04
GC13	GC11	
GC18	GC12	
GC23	GC16	
GC39	GC20	
	GC20b	
	GC22	
	GC26	
	GC29	
	GC30	

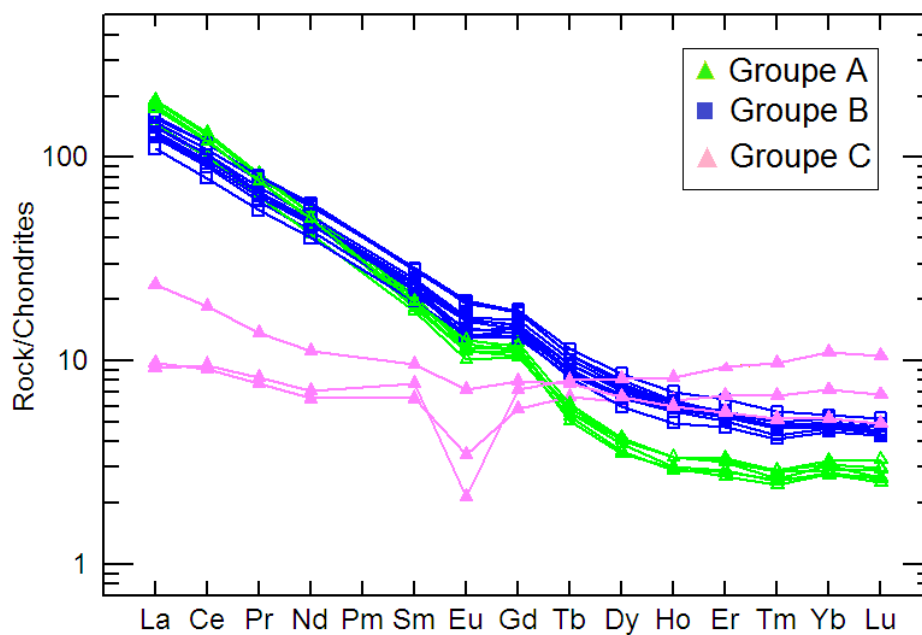


Figure 5.17 : Spectres des terres rares normalisés aux valeurs des chondrites de types C1 définies par Sun et McDonough (1989).

La forme similaire des spectres des terres rares des groupes A et B pourrait suggérer qu'ils ont été générés par la même chambre magmatique (Fig. 5.17). L'augmentation des concentrations en terres rares légères et la diminution des terres rares lourdes dans le groupe A par rapport au groupe B indiquent généralement des processus de différenciation magmatique, de cristallisation fractionnée ou d'altération.

Dans ce cas-ci, la différence est possiblement reliée à la différenciation magmatique par cristallisation fractionnée d'amphiboles ce qui expliquerait la nature plus différenciée des granitoïdes du groupe A (Fig. 5.21) et l'appauvrissement en terres rares lourdes. En revanche, la forme différente des spectres des terres rares pour le groupe C suggère que ces roches se sont formées lors d'un événement différent que celui à l'origine de la formation des roches des groupes A et B.

La figure suivante montre bien la différence de compositions en éléments majeurs des échantillons des trois groupes de granitoïdes. Les roches du groupe B sont les moins évoluées comme en témoigne les concentrations plus élevées en Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , et MgO (Fig. 5.18). Les roches du groupe A sont plus évoluées que celles du groupe précédent et se distribuent entre les échantillons des groupes B et C. Finalement les roches du groupe C occupent un domaine de hautes concentrations en SiO_2 typique de compositions granitiques. Les roches du groupe C sont systématiquement appauvries en Al_2O_3 , MnO , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO par rapport aux autres granitoïdes de la propriété (Fig. 5.18). Notez que dans l'ensemble, les granitoïdes des groupes A à C ne montrent pas de signes d'altérations hydrothermales importantes. Par exemple, les concentrations en Na_2O ne varient pas (moyenne de 2,5 % Na_2O) et les concentrations en CaO semblent principalement contrôlées par des processus de différenciation magmatique (Fig. 5.18).

Pour vérifier l'hypothèse que cette subdivision de granitoïdes reflète en réalité des degrés variables de différenciation de magmas felsiques nous avons calculé les valeurs de l'indice de différenciation de Segerstrom and Young (1972). Cet indice s'exprime comme ceci :

$$ID = \frac{SiO_2 + Na_2O + K_2O}{FeO + Fe_2O_3 + MgO + CaO}$$

Sur ce diagramme, les données des granitoïdes des groupes A à C se distribuent le long d'une courbe de différenciation magmatique ce qui supporte l'hypothèse de différenciation (Fig. 5.19).

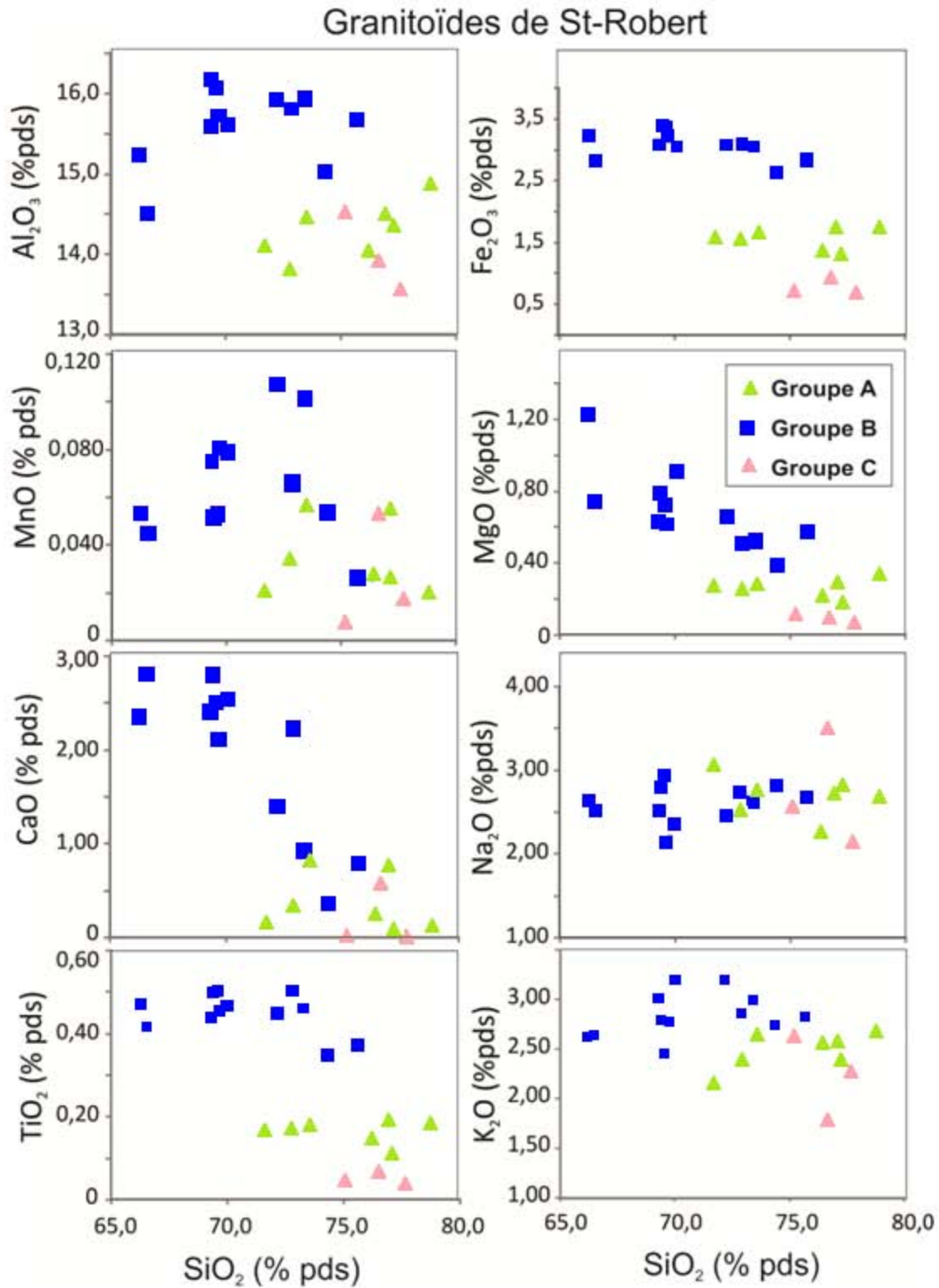


Figure 5.18 : Diagrammes de variations des concentrations en oxydes des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction des concentrations en SiO_2 .

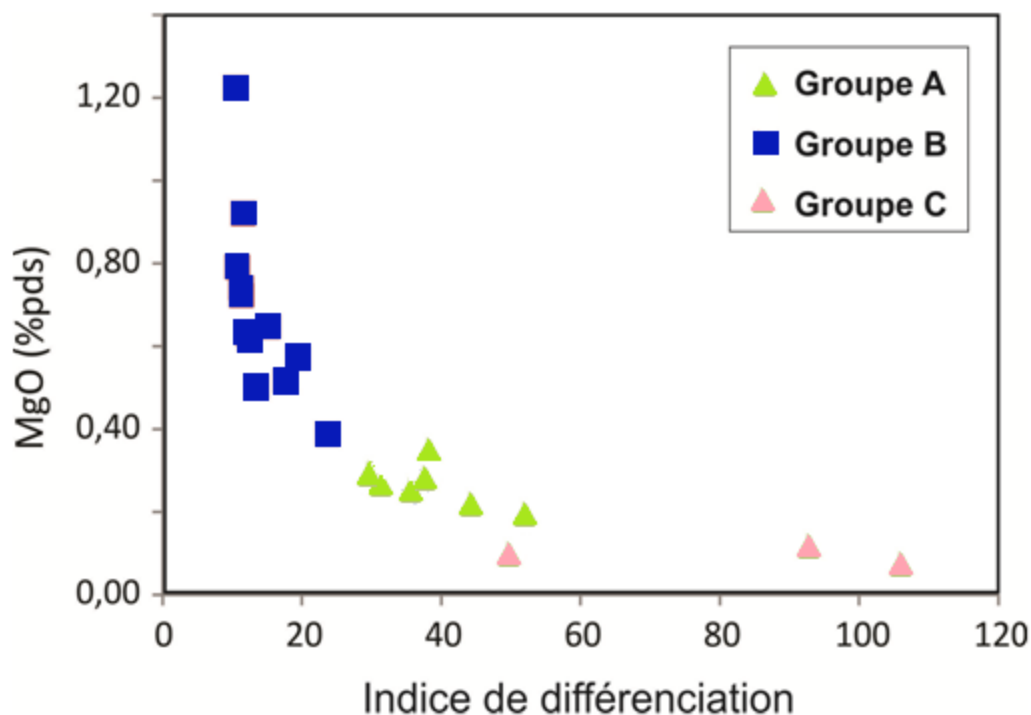


Figure 5.19 : Diagrammes de variation des concentrations en MgO (%pds) des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction de l'indice de différenciation de Segerstrom et Young (1972).

Les figures 5.20 et 5.21 présentent différents diagrammes de classification des roches plutoniques. Dans le cas de St-Robert, il est important de rappeler que les échantillons des groupes A et C montrent généralement des matrices aphanitiques avec des phénocristaux de quartz et feldspath (porphyres). Pétrographiquement, ces roches se rapprochent plus de rhyolites que de granitoïdes. Ceci explique pourquoi nous utilisons le diagramme de LeMaitre et al. (1989) (Fig. 5.21) qui est calibré pour la classification des roches volcaniques. De ce fait, nous pensons que ces roches seraient de type rhyolitique ce qui est supporté par la figure 5.21.

Les roches du groupe B semblent, quant à elles, faire partie des granodiorites et minoritairement de granites (Fig. 5.20).

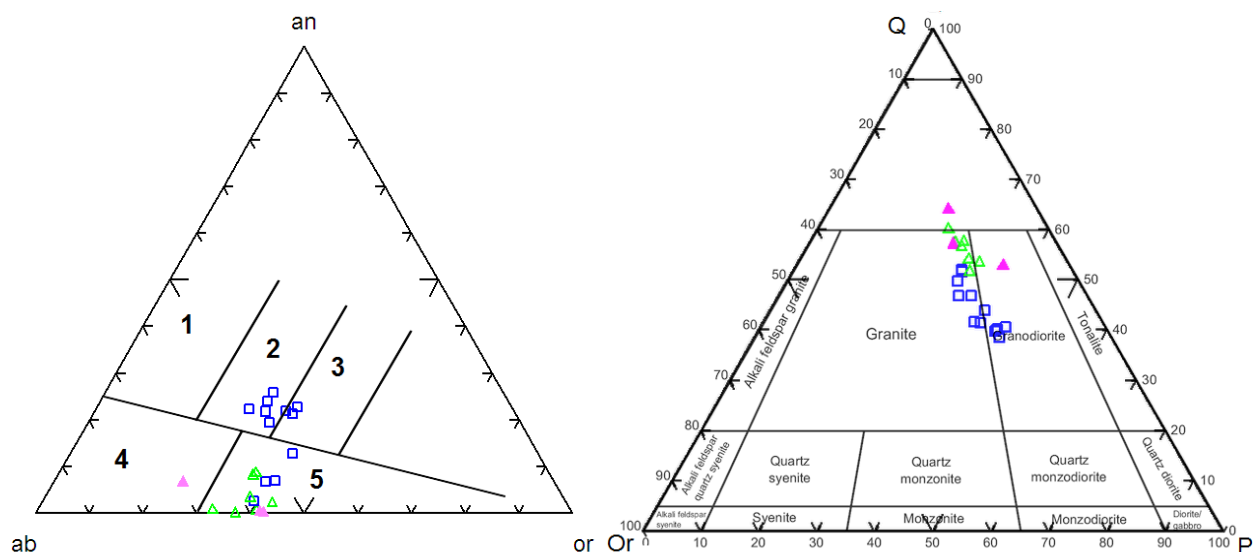


Figure 5.20 : À gauche : Diagramme de classification des roches granitiques de Barker (1979) : 1 : Tonalite, 2 : Granodiorite, 3 : Quartz-monzonite, 4 : Trondhjémite, 5 : Granite. À droite : Diagramme de Streckeisen (1976) appliqué aux roches intrusives de St-Robert. An : anorthite, or : orthoclase, Ab : albite, Q : quartz, P : plagioclase. Carrés bleus : groupe B; triangles roses : groupe C; triangles verts : groupe A.

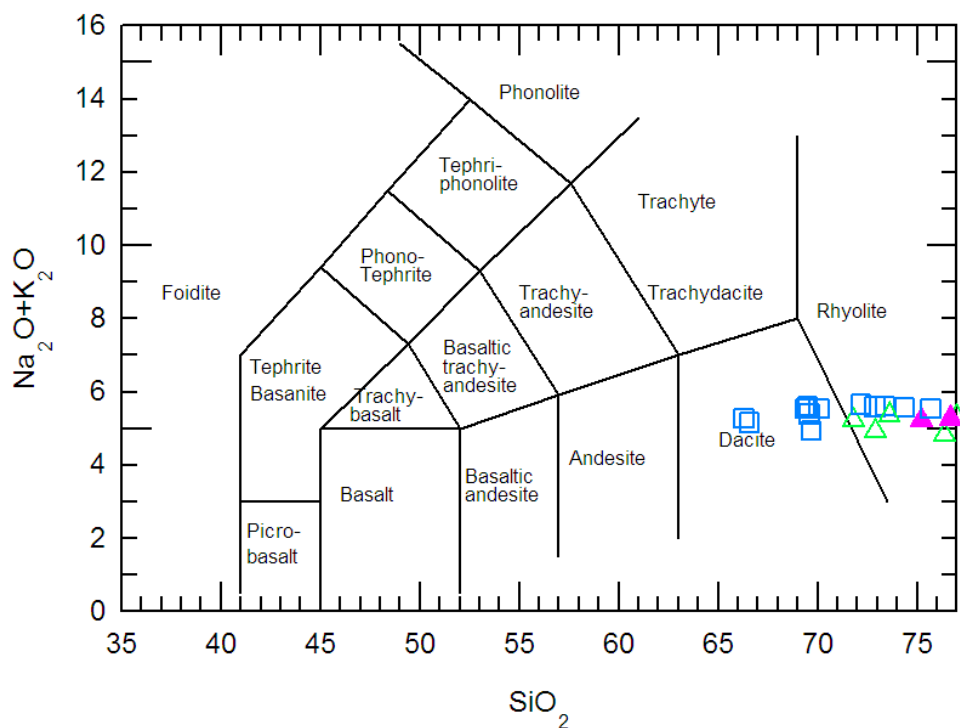


Figure 5.21 : Diagramme de classification des roches volcaniques selon LeMaitre et al. (1989). Carrés bleus : groupe B; triangles roses : groupe C; triangles verts : groupe A.

5.5.2 Altération des granitoïdes de la propriété St-Robert

La cartographie détaillée du dyke felsique, affleurant le long de la falaise de la zone minéralisée Centre, suggère que les dykes felsiques ne devraient pas être significativement altérés par l'hydrothermalisme associé à la mise en place des zones minéralisées. Toutefois, compte tenu de la présence de déformations locales contemporaines à la mise en place de ces dykes, il est probable que localement sur la propriété des dykes soient légèrement altérés.

Comme mentionné dans ce chapitre, les granitoïdes de St-Robert semblent peu altérés par rapport aux roches sédimentaires de la Formation de Frontenac. L'absence de lessivage en Na_2O reflète bien ce constat. De plus ces roches ne montrent pas d'évidences d'enrichissement en Na_2O pouvant refléter une albitisation. Afin de vérifier l'importance des processus d'altération affectant les roches des groupes A à C nous avons rapporté les variations des concentrations en oxydes d'éléments majeurs en fonction de l'indice d'altération d'Ishikawa et al. (1976) (Fig. 5.22). Cet indice d'altération est efficace pour estimer l'intensité de l'altération de roches magmatiques felsiques.

La figure 5.22 montre effectivement une très faible variabilité de l'indice A.I. Les valeurs de cet indice se distribuent près de la valeur de 50 % ce qui correspond aux valeurs normalement observées dans des roches magmatiques felsiques non altérées. L'absence de corrélations entre CaO -A.I., K_2O -A.I et MgO -A.I. suggère que ces éléments n'ont pas été mobilisés d'une façon significative (Fig. 5.22). L'essentiel des variations de concentrations en oxydes d'éléments majeurs observées sur la figure 5.22 ne peut s'expliquer que par des contrastes de différenciation magmatique.

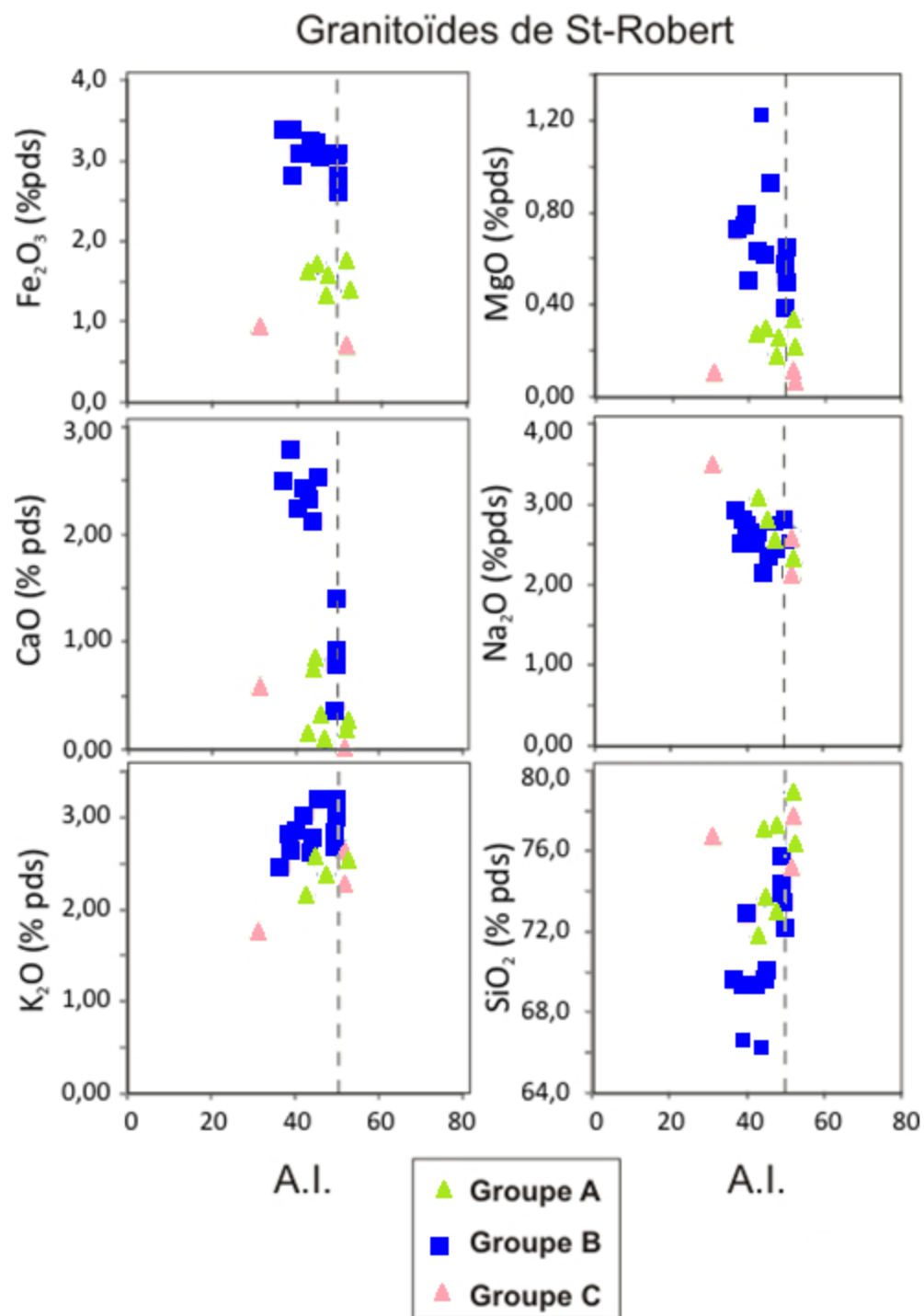


Figure 5.22 : Diagrammes de variations des concentrations en oxydes des granitoïdes de la propriété St-Robert en fonction de l'indice d'altération d'Ishikawa et al. (1976).

5.5.3 Contexte tectonique de mise en place des roches intrusives

Plusieurs diagrammes géochimiques ont été proposés pour discriminer l'environnement tectonique de formation des roches ignées intrusives.

Les figures 5.23 et 5.24 montrent la projection des roches ignées de la propriété St-Robert sur des diagrammes de discrimination.

Les roches ignées de la propriété semblent être également d'affinité calco-alkaline (Fig. 5.23a) comme nous le montre le diagramme discriminant de Irvine et Baragar (1971). De plus, d'après l'ensemble de ces diagrammes, il est probable que les roches intrusives appartenant aux groupes A et B (Tab. 5.1) se seraient formées dans un contexte d'arc volcanique, tout comme les intrusions dévoniennes de la région. Cette observation appuie également l'hypothèse que la masse intrusive de St-Robert soit contemporaine aux autres plutons d'arc volcanique observés dans la région.

Les rhyolites du groupe C semblent s'individualiser par rapport aux autres groupes pour ce qui est de l'environnement tectonique. En effet, les diagrammes de la figure 5.23 montrent que les roches du groupe C se situent généralement entre les champs de granites d'arcs volcaniques et de granites synorogéniques.

Le diagramme de Brown et al. (1984) suggère également une origine plus tardive de ce groupe de roche par rapport aux autres (Fig. 5.23b).

De même, les spectres des terres rares des roches du groupe C ne présentent pas la même forme que ceux des groupes A et B. Les terres rares étant difficilement solubles, les processus d'altération ou de métamorphisme ne peuvent être à l'origine de cette différence. De ce fait, nous pouvons supposer que ces dykes rhyolitiques se seraient formés postérieurement aux autres. La forte anomalie négative en Eu de ces roches peut s'expliquer par une concentration en SiO₂ élevée et un plus fort fractionnement de plagioclase pendant la fusion partielle de la source ou lors de la cristallisation fractionnée. Nous n'avons pas pu observer sur le terrain de recoupement particulier afin de valider cette hypothèse.

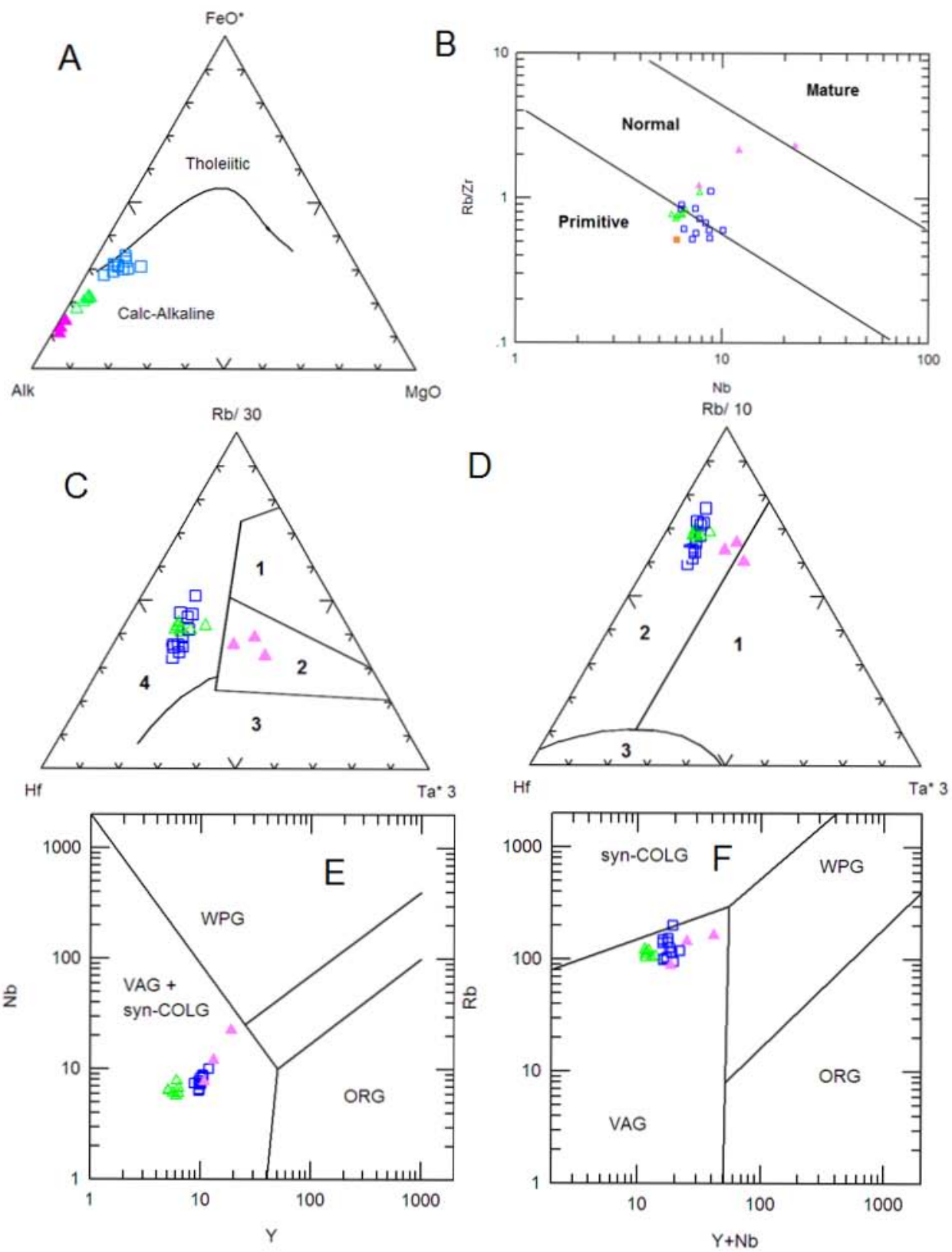


Figure 5.23 :

A) : Diagramme de classification des séries volcaniques d'après Irvine et Baragar (1971).
 B) : Diagramme Rb/Zr en fonction de Nb de Brown et al. (1984) pour déterminer la maturité d'un arc volcanique.
 C) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Harris et al. (1986) montrant les champs des granites syn-collision (1), post-collision (2), intraplaques (3) et d'arcs volcaniques (4).
 D) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Harris et al. (1986) montrant les champs des granites intraplaques (1), d'arcs volcaniques (2) et de rides océaniques (3).
 E) et F) : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Pearce et al. (1984) montrant les champs des granites syn-collision (syn-COLG), intraplaques (WPG), de rides océaniques (ORG) et d'arcs volcaniques (VAG).
 Triangles verts : groupe A, triangles roses : groupe C, carrés bleus : groupe B.

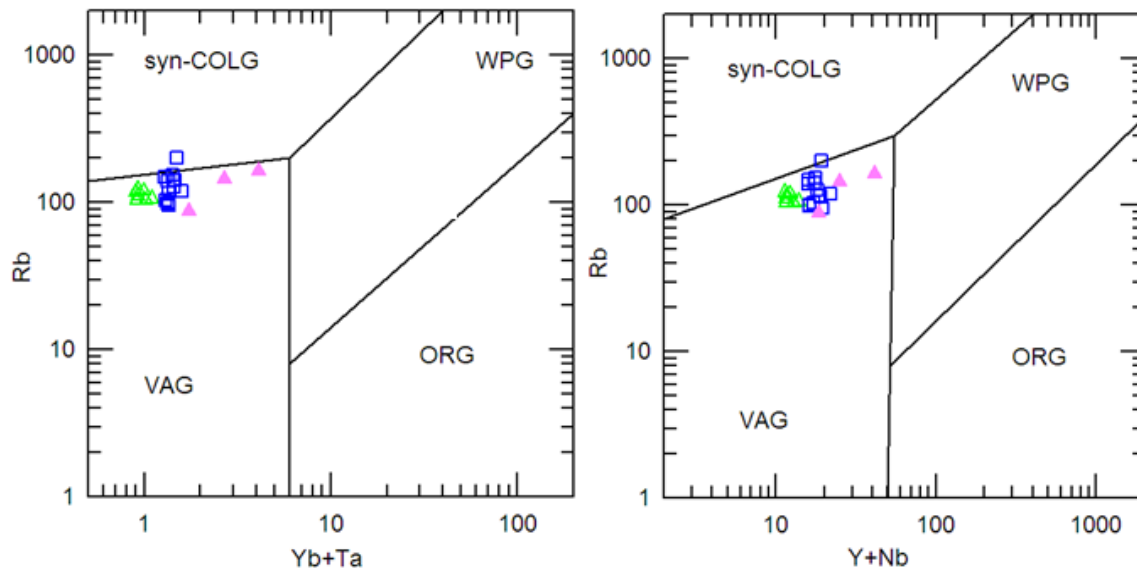


Figure 5.24 : Diagrammes de discrimination pour les granites d'après Pearce et al. (1984) montrant les champs des granites syn-collision (syn-COLG), intraplaques (WPG), de rides océaniques (ORG) et d'arcs volcaniques (VAG). Triangles verts : groupe A, triangles roses : groupe C, carrés bleus : groupe B.

Dans le chapitre 2, nous avons pu observer que de nombreuses intrusions dévoniennes sont présentes dans la région. À l'aide des analyses géochimiques de 275 échantillons effectuées par Bourne (1989), nous avons également effectué des diagrammes discriminants pour les intrusions dévoniennes de la région afin de comparer les résultats à ceux obtenus pour les roches ignées présentes sur la propriété St-Robert (Fig. 5.25).

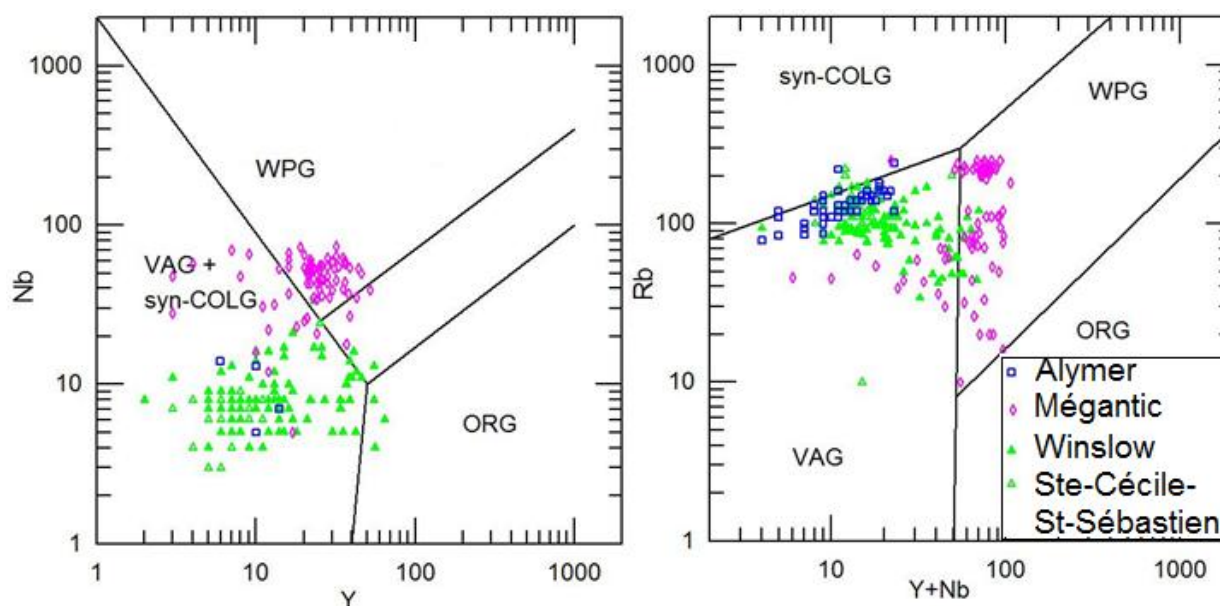


Figure 5.25 : Diagrammes discriminants Nb-Y et Rb- (Nb-Y) pour les données géochimiques des plutons d'Aylmer, Mégantic, Winslow et St-Sébastien-Ste-Cécile. Subdivisions issues de Pearce et al. (1984), données tirées de Bourne (1988). Aucune analyse en Y n'est disponible pour les intrusions de Scotstown et de du lac aux Araignées.

La figure 5.25 montre que les plutons d'Aylmer, de Winslow et de St-Sébastien-Ste-Cécile se situent globalement dans le domaine d'arc volcanique (VAG) à la frontière du champ synorogénique (syn-COLG) comme pour les roches ignées de la propriété St-Robert.

Nous pouvons donc en déduire que l'intrusion de St-Robert, représentée par les groupes de roches A et B, est certainement issue du même contexte géodynamique que les intrusions dévoniennes régionales et qu'elle est certainement contemporaine à ces intrusions.

Le pluton du mont Mégantic se situe quant à lui essentiellement dans le domaine intraplaque ce qui est consistant avec son affiliation avec les Montérégiennes.

5.6 Analyses des principales veines minéralisées

Le but de ces analyses était de vérifier le potentiel minéral des principales veines minéralisées et de localiser spatialement ces zones. Notez que lors des travaux de terrain nous n'avions pas accès à des équipements lourds comme des excavatrices et que le couvert forestier s'était refermé sur la majorité des zones minéralisées (Fig. 5.26). Nous avons donc recherché et dégagé manuellement les principales veines de quartz. Ces veines étaient facilement accessibles, car ayant été mécaniquement nettoyées dans le passé (environ 30 à 40 ans). À l'opposé, trop souvent les épontes de ces veines n'avaient pas été excavées et n'étaient donc pas accessibles pour l'échantillonnage par rainurage.

En l'absence de carottes de forage (archives détruites), seul le rainurage des affleurements a pu être réalisé en 2011. Ceci explique pourquoi relativement peu d'épontes ont pu être recueillies et analysées lors de nos travaux sur le terrain. De plus, les analyses des échantillons de carottes de forage réalisées par les différentes compagnies s'étant succédé sur la propriété ont très peu ciblé les épontes des veines de quartz. De ce fait, nous considérons que les épontes des veines ont été systématiquement sous-échantillonnées dans le passé et qu'un réel potentiel semble résider dans ces dernières (présence de sulfures imprégnés dans la porosité des grès).

Les figures 5.27 à 5.37 montrent les résultats des analyses des principales veines minéralisées des zones Sud (Fig. 5.27, 5.28 et 5.29), Centre (Fig. 5.32) et Nord (Fig. 5.35, 5.36 et 5.37).

5.6.1 Zone Sud

Cinquante échantillons ont été prélevés sur les veines 1, 4, 6, 7 et 9 de la zone Sud. Cette zone est surtout reconnue pour son potentiel minéral en galène, pyrite et sphalérite (Fig. 5.27, 5.28, 5.29).

L'échantillonnage en rainure a montré de hautes teneurs en plomb sur la majorité des veines avec même une teneur de 9% mesurée sur une des veines de cette zone. Des concentrations intéressantes en argent ont été observées dans certaines veines (577 g/t dans GC-57 et 503 g/t dans SR-04-09). Pour les autres échantillons riches en Pb, les concentrations en argent étaient en traces.

De ce fait, malgré la présence de galène, il est possible que dans cette partie de la propriété la composition et la température des fluides hydrothermaux n'étaient pas aussi propices à la précipitation de l'argent. De plus, à l'exception d'un échantillon contenant 100 ppb d'or (GC-57), cet élément ne semble pas présent dans cette zone minéralisée.



Figure 5.26 : Photographie des veines minéralisées V7 et V4 de la zone Sud.

Cet échantillonnage nous a toutefois permis de noter la présence de deux zones (en rouge) contenant de fortes teneurs en Pb, Bi, Zn, Ag et W. Les échantillons GC57 et GC58 très minéralisés correspondent à une veine de quartz (GC57) et son éponte (GC58) d'environ 15 centimètres de large affleurant sur environ deux mètres. Cette veine et ses épontes devraient être forées plus en profondeur afin de vérifier leur potentiel. Les échantillons GC55 et GC56 correspondent également à des veinules de quartz minéralisées, échantillonnées à la main. Aussi, nous avons observé la présence de fortes concentrations en tungstène dans la partie SE de la zone minéralisée (10 000 ppm dans SR-04-09 et 5930 ppm dans SR-04-10).

De plus, à quelques centimètres à l'ouest de la veine 9, nous avons pu noter la présence d'une autre veine (9B), d'environ cinq centimètres d'épaisseur qui contient de fortes valeurs en Pb, Zn et Bi. Nous avons pu la suivre sur quelques mètres, mais ensuite le sol est trop épais.

Globalement, pour l'instant, nous ne pouvons conclure que les épontes de ces veines présentent un potentiel minéral significatif. Toutefois des valeurs intéressantes sont localement observées comme dans l'échantillon GC-58. Des forages devraient être implantés de part et d'autre de ces veines pour évaluer le réel potentiel de cette zone minéralisée.

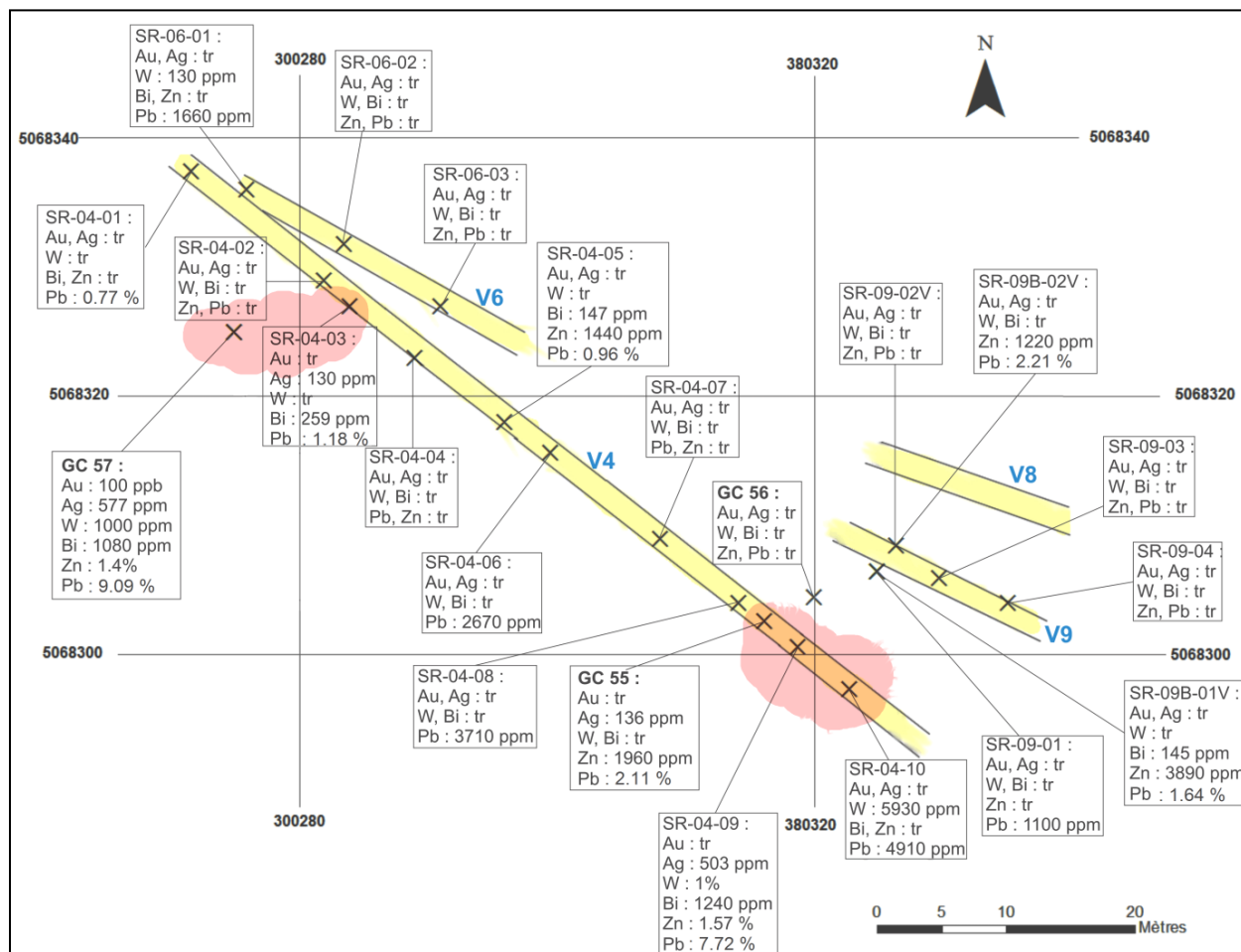


Figure 5.27 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 4, 6 et 9 de la zone Sud. Seuls les résultats des veines sont représentés sur cette figure. La figure 5.28 présente les résultats d'analyses pour les épontes. Les zones en rouge correspondent aux zones contenant beaucoup de minéralisation.

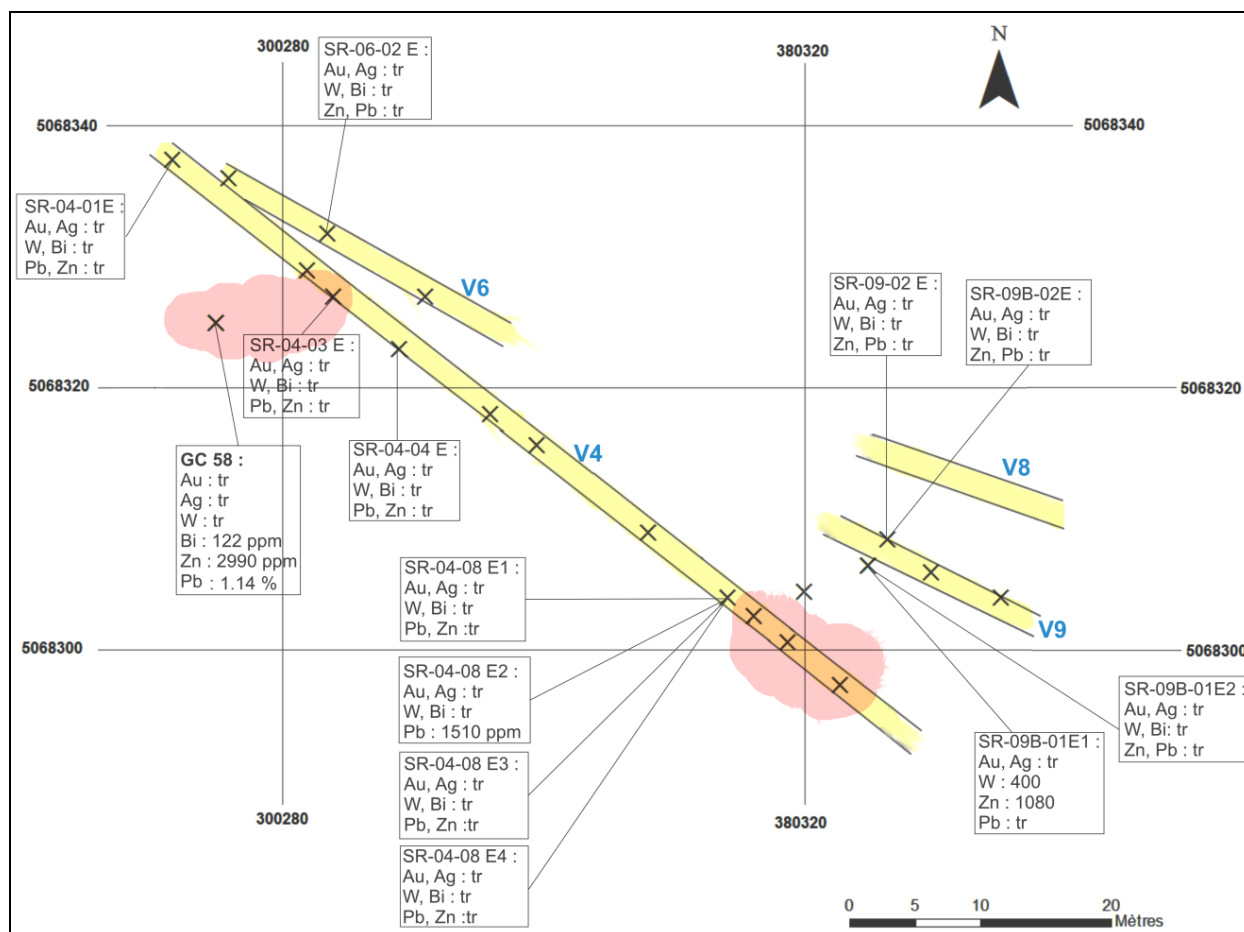


Figure 5.28 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 4, 6 et 9 de la zone Sud. Seuls les résultats des épontes sont représentés sur cette figure. La figure 5.27 présente les résultats d'analyses pour les veines. Les zones en rouge correspondent aux zones contenant beaucoup de minéralisation.

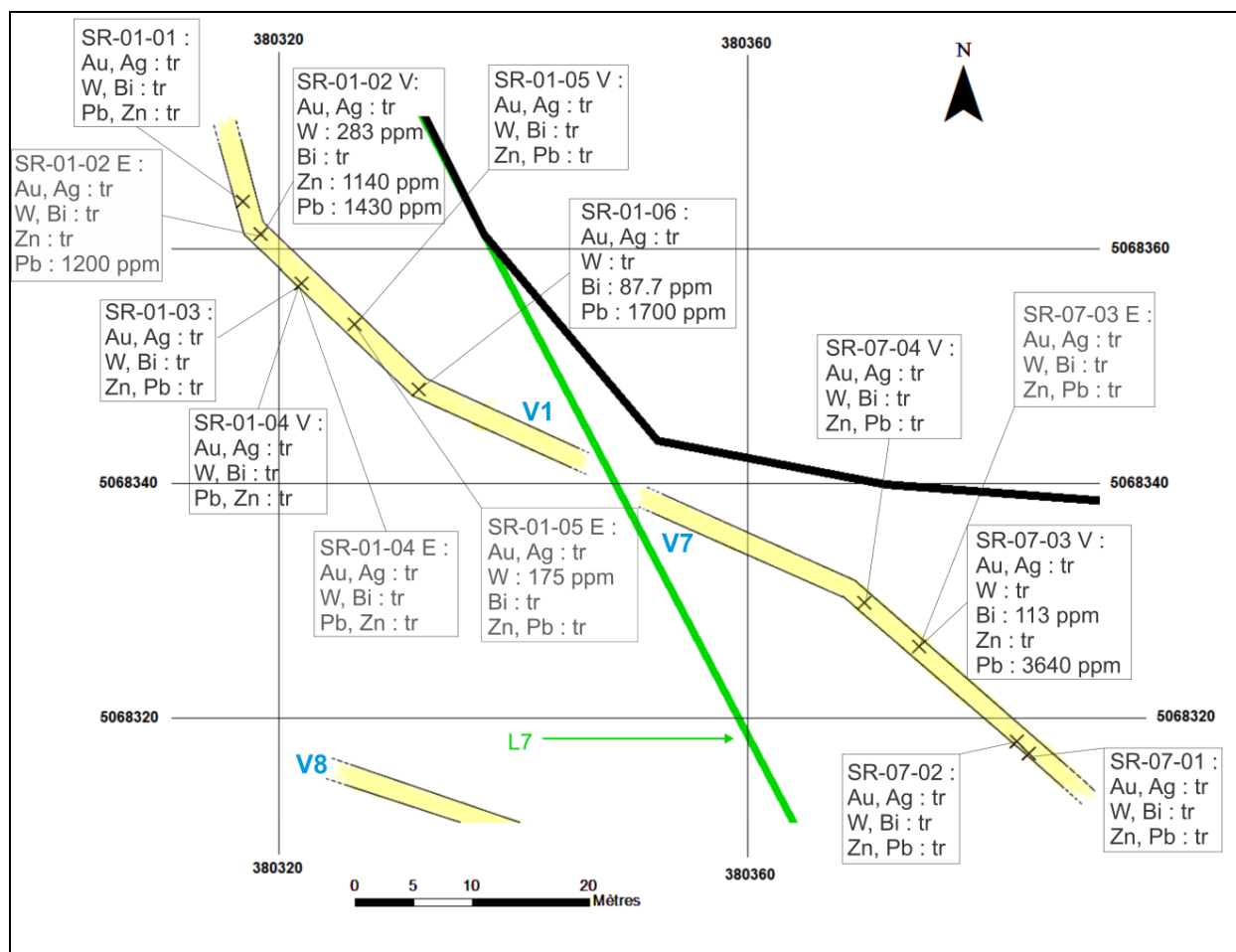


Figure 5.29 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur les veines 1 et 7 de la zone Sud. Les résultats des veines sont présentés en noir tandis que ceux des épontes sont présentés en gris.

Notez que l'imprécision du géoréférencement des anciens forages ne permet pas de corrélérer avec exactitude les résultats du rainurage des affleurements aux valeurs obtenues dans les carottes des anciens forages. Nous pouvons cependant noter la présence de quelques zones nettement minéralisées d'après les journaux de sondages qui pourraient correspondre aux zones minéralisées observées lors du rainurage (Fig. 5.30).

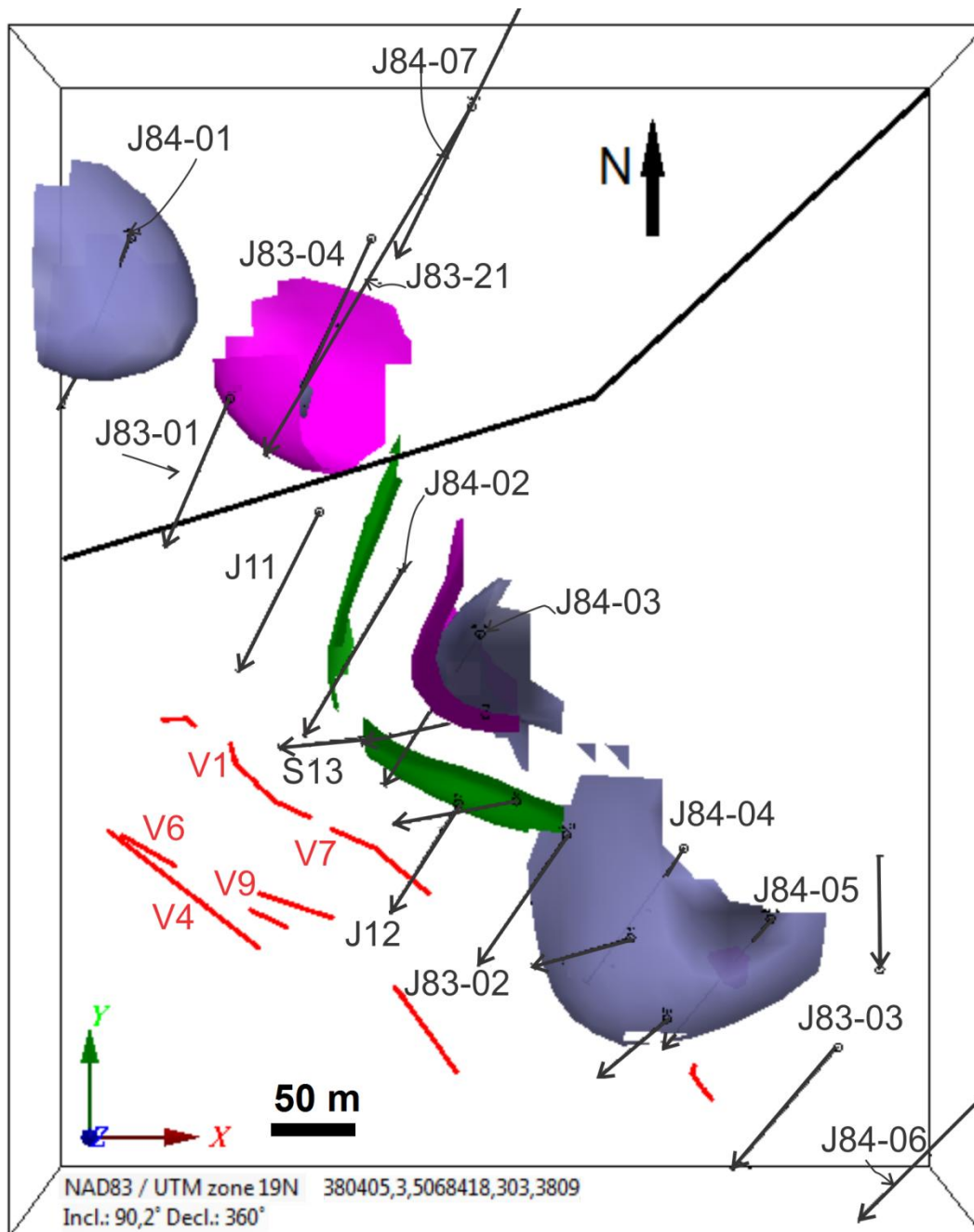


Figure 5.30 : Vue oblique d'une représentation 3D des iso-valeurs en Pb (2 %), Bi (0,2 %) et Ag (200 g/t). Le rose correspond à l'Ag, le gris-bleu au Pb, et le vert au Bi. Les veines et les sondages sont également représentés. Attention, sur ce plan, le géoréférencement des sondages n'est pas exact. Le trait épais noir correspond au chemin de la mine.

5.6.2 Zone Centre

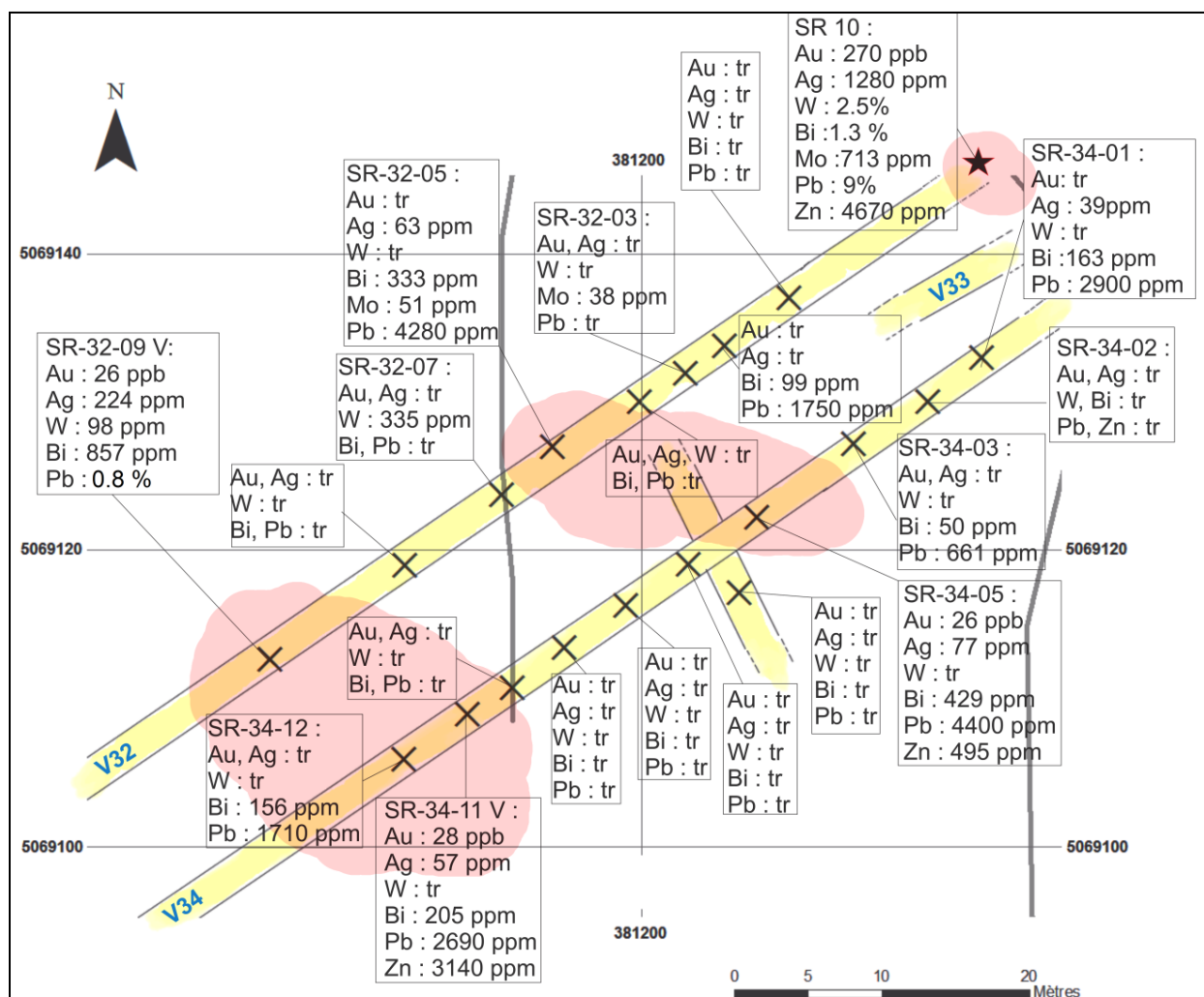
La zone Centre est la partie la plus importante de la propriété St-Robert. Cette zone a fait l'objet de nombreux travaux d'exploration et plusieurs galeries souterraines ont été creusées dans le roc sous la surface (tunnel Lacombe). Une des principales interrogations sur le potentiel minéral de cette zone minéralisée est de savoir si localement elle contient des concentrations significatives en or. Les résultats de l'échantillonnage par rainurage de 2011 sont présentés à la figure 5.32.



Figure 5.31 : Photographie de la veine 32 de la zone minéralisée Centre.

En raison du nombre peu élevé d'échantillon et d'un prélèvement uniquement de surface, les résultats de nos analyses ne nous permettent pas de conclure sur la présence ou non d'un potentiel pour l'or dans cette zone minéralisée.

Ceci pourrait suggérer un gradient d'enrichissement en or vers l'est qui serait compatible avec la présence d'or détectée dans les anciens forages et aussi avec les résultats du levé pédogéochimique (chapitre 4) suggérant la présence d'or dans cette partie de la propriété. De même, les analyses effectuées sur les anciens sondages ont montré de très bonnes valeurs en or avec une moyenne de 29 g/t. Il se peut cependant que la zone enrichie en or soit étroite et difficilement accessible par sondage.



149

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons représenté les sondages en trois dimensions à l'aide du logiciel Target de Geosoft (Fig. 5.33). Nous avons pu observer que les zones riches en or interceptées par les sondages de St-Robert Metals dans les années 50 n'ont jamais été réinterceptées par les sondages réalisés par Les Mines J.A.G. Itée. De ce fait, il est très probable que cette zone en or existe bel et bien.

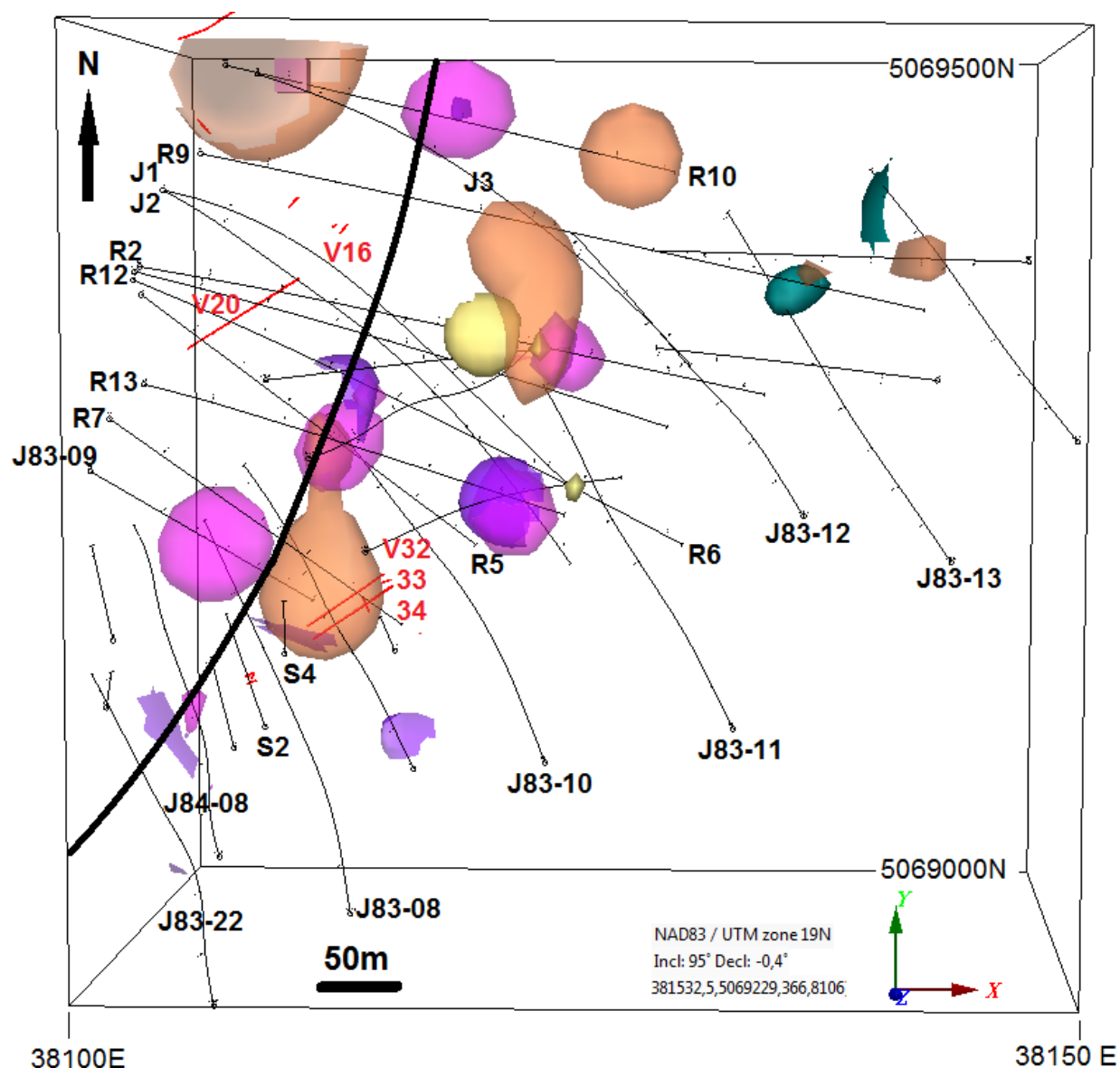


Figure 5.33 : Vue oblique d'une représentation 3D des iso-valeurs en Pb (1,5%) en violet, Bi (0,1 %) en vert, Ag (100 g/t) en rose, Au (2 g/t) en jaune, WO₃ (0,5 %) en orange. Les veines et les sondages sont également représentés. Attention, le géoréférencement des sondages n'est pas exact. Le trait épais noir correspond au chemin de la mine.

Pour ce qui est des autres métaux, il existe également un réel potentiel en Pb, Ag, Zn, Bi et W dans cette zone comme nous pouvons le voir sur la figure 5.32. Sept échantillons ont rapporté de fortes concentrations en plomb. Ces valeurs s'échelonnent de 0,29 à 9 % Pb. L'échantillon SR-10 le plus riche en Pb est aussi celui le plus riche en Au. Contrairement à la zone sud, six échantillons montrent de fortes concentrations en Ag. Ces dernières varient de 39 à 1280 g/t. Neuf échantillons montrent des concentrations anormales en Bi qui s'échelonnent entre 99 et 13 000 ppm. Pour ce qui est du tungstène, l'échantillon SR-10 contient 2,5 % de ce métal.

Encore une fois, soulignons que l'échantillonnage a été réalisé uniquement en surface de l'affleurement et très peu d'épontes ont été analysées. Ces dernières devraient être systématiquement forées afin de définir le réel potentiel de cette zone.

Les figures 5.32 et 5.33 montrent que la minéralisation dans le secteur de la zone Centre est hétérogène. Notez que plusieurs forages n'ont pas été systématiquement échantillonnés et analysés pour certains métaux, ce qui accentue de beaucoup les discontinuités apparentes sur la figure 5.33. Selon les anciennes données de forage, il semble que la zone riche en or aurait également un fort potentiel en argent et tungstène. Ce constat est similaire à celui de l'étude des données de rainurage de 2011 qui suggère une relation entre l'Au, le W, le Pb et l'Ag dans les échantillons de la zone Centre.

Enfin nous pouvons remarquer sur la figure 29 que les veines 32 et 34 que nous avons échantillonnées ne se situent pas dans une des zones fortement minéralisées en métaux et Ag et que seulement le tungstène montre de fortes concentrations en forage.

5.6.3 Zone Nord

La zone Nord est caractérisée entre autres par la présence de cosalite, un sulfosel de plomb et de bismuth peu commun. Elle est accompagnée généralement de galène et de pyrite. Nous avons également pu voir dans le chapitre 3, à l'aide du microscope à balayage électronique (MEB), de la bismuthinite jusqu'ici non observée sur la propriété St-Robert.

Dans les années 1980, la compagnie les MINES J.A.G. a découvert deux dykes felsiques riches en tungstène. L'indice Lachance correspond à un de ces dykes et contiendrait, d'après les analyses réalisées pour la compagnie les MINES J.A.G en 1983, jusqu'à 18.8% de tungstène. Malgré le très fort potentiel minéral de cette partie de la propriété, très peu de forages ont été réalisés.

Nous avons échantillonné en 2011 deux veines affleurantes dans ce secteur (V22 et V24).

La veine 22 consiste en une veine rectiligne orientée NE-SO et d'une longueur minimale de 170 mètres (Fig. 5.35 et 5.36). Cette veine est caractérisée par des abondances relativement élevées en W, Pb, Bi et localement en Mo. Ces éléments ne sont pas distribués d'une façon homogène le long de la veine. Des abondances de 135 à 1580 ppm de W ont été observées dans trois échantillons et une concentration de 853 ppm de Mo a été observée dans l'échantillon SR-22-2-05V. Quatre échantillons ont rapporté des concentrations anormales en bismuth (de 241 à 536 ppm) et deux échantillons montrent des valeurs anormales en plomb (1190-1520 ppm).

La veine 24 consiste en une veine également rectiligne, orientée NE-SO et d'une longueur minimale de 145 mètres (Fig. 5.34 et 5.37). Cette veine est beaucoup plus minéralisée que la veine précédente. Entre autres cette zone est enrichie en Pb, Bi et Au. Cinq échantillons ont rapporté des concentrations élevées en bismuth (de 1200 à 8900 ppm) et plomb (de 1600 à 10 100 ppm). Quatre échantillons sont enrichis en or (48 - 366 ppb). Dans l'ensemble les concentrations les plus élevées en or sont associées aux zones riches en Pb et Bi. Finalement des concentrations de 138 à 188 ppm d'argent ont été observées dans trois échantillons.



Figure 5.34 : Photographie de la veine minéralisée V24.

À la vue des résultats obtenus, la veine 22 semble peu minéralisée, mis à part la présence de quelques zones présentant des minéralisations importantes en Bi (jusqu'à 0,03 %), Pb et même W (Fig. 5.35 à 5.37). Il semble que la veine 24 contienne beaucoup plus de minéralisation avec des valeurs en bismuth et plomb pouvant atteindre 1 %, ce qui est loin d'être négligeable. Quelques bonnes valeurs en argent et en tungstène ont également été observées ainsi qu'un échantillon contenant 0,3 ppm d'or. Une étude approfondie de cette veine devrait être réalisée et des forages devraient être effectués au niveau des deux zones d'intérêt (en rouge) afin de voir si cette minéralisation se continue plus en profondeur.

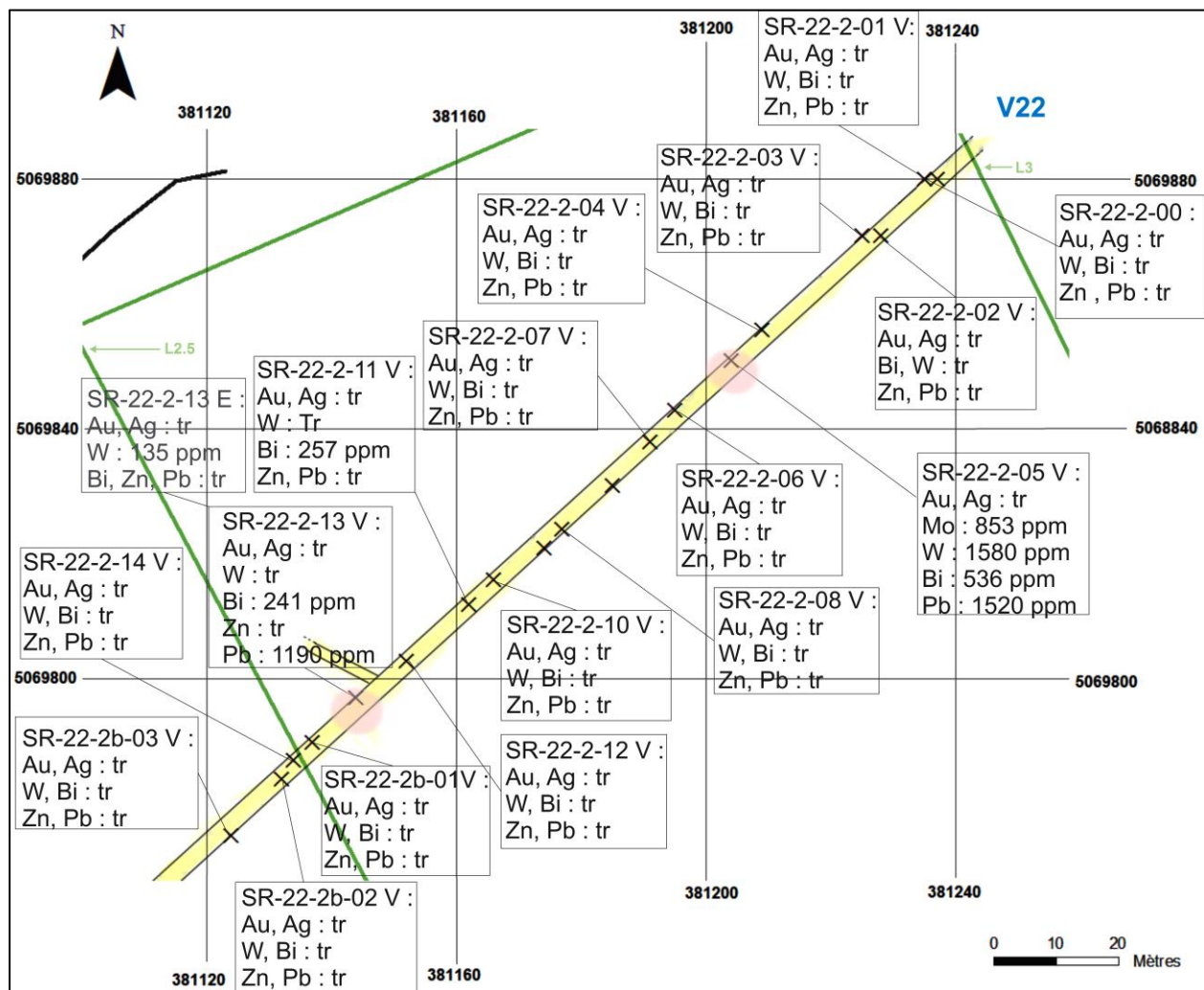


Figure 5.35 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur la partie nord-est de la veine 22 de la zone Nord. Seuls les résultats des épontes contenant des teneurs en métaux sont présentés sur cette figure (gris). Pour le reste, veuillez vous référer en annexe D. Les surfaces en rouge correspondent aux zones contenant beaucoup de minéralisation.

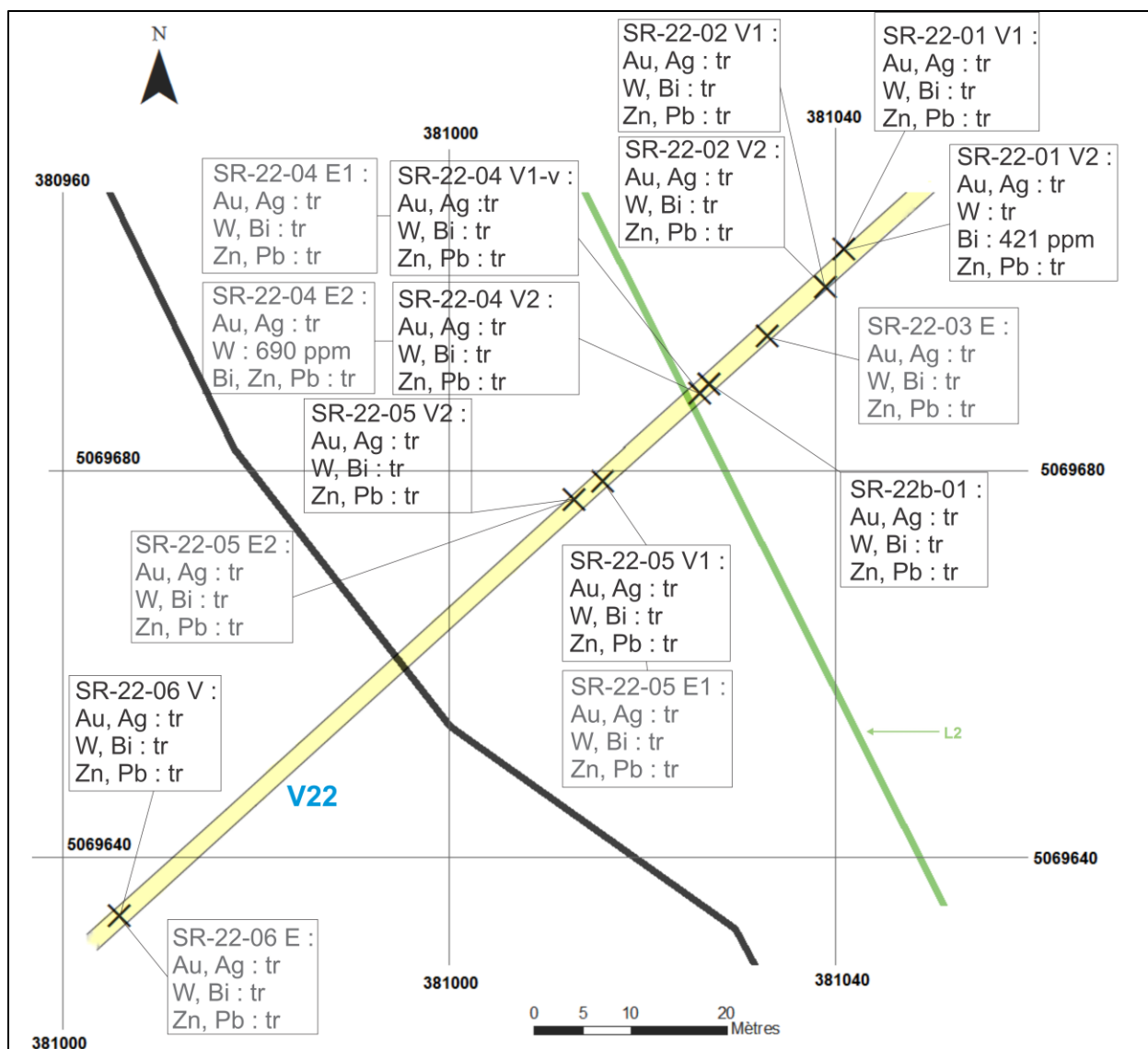


Figure 5.36 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectué sur la partie sud-ouest de la veine 22 de la zone Nord. Les résultats des épontes sont présentés en gris tandis que ceux des veines sont en noirs.

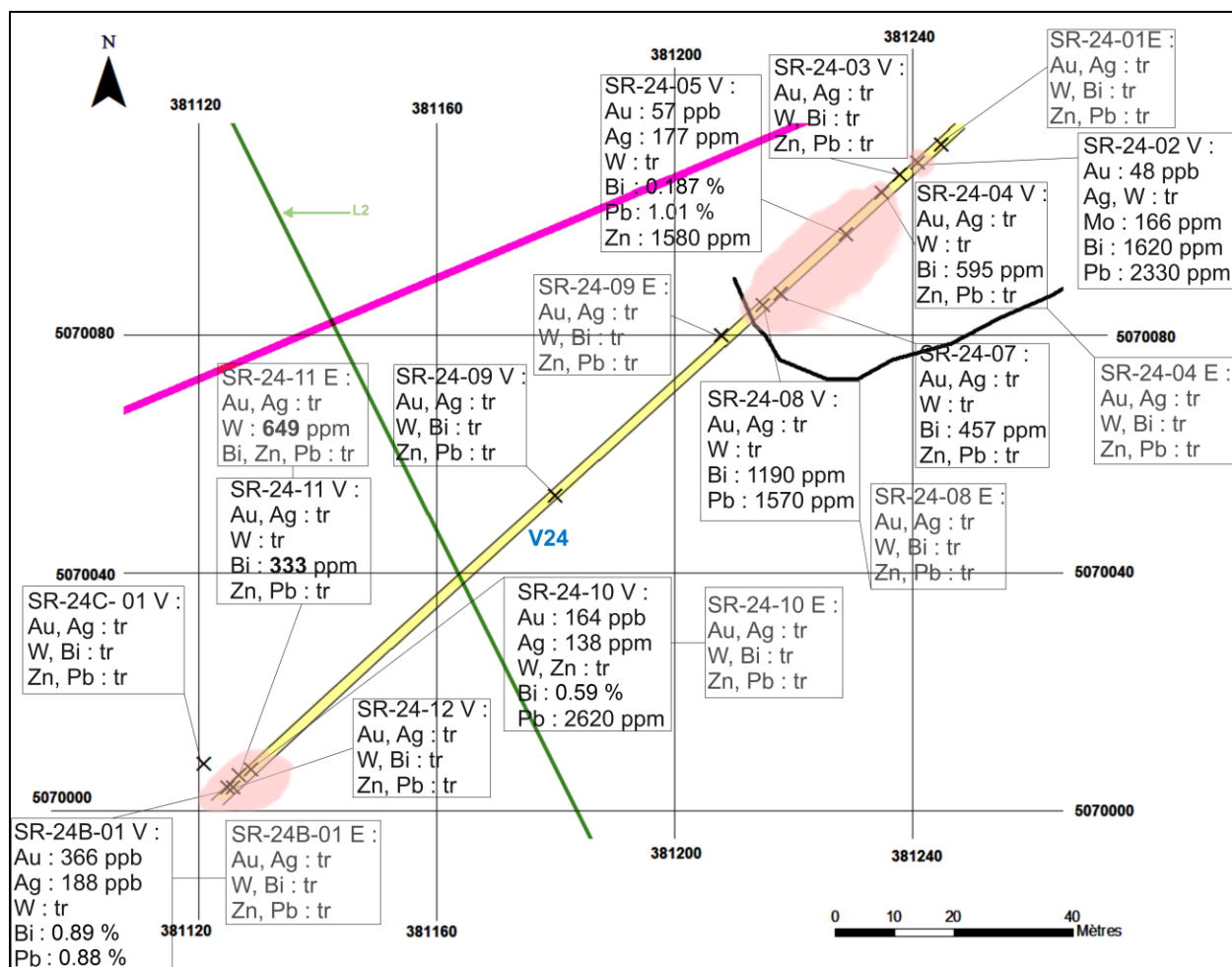


Figure 5.37 : Résultats des analyses de l'échantillonnage en rainure effectuées sur la veine 24 de la zone Nord. Les résultats des épontes sont présentés en gris tandis que ceux des veines sont en noir. Les surfaces en rouge correspondent aux zones contenant beaucoup de minéralisation.

5.7 Analyses radiométriques

Des levés radiométriques systématiques (102 mesures de K(%), eU (ppm) et eTh (ppm)) et deux sections radiométriques réalisées sur l’affleurement principal de la zone Centre (Falaise) et sur un affleurement situé entre la zone Sud et la zone Centre ont également été effectués. De plus, un levé radiométrique mobile couplé à un DGPS (Differential Global Positioning System) a été réalisé.

Le levé radiométrique mobile a été effectué sur les principaux chemins de la propriété. Or, ces chemins sont en gravier issus d’une carrière située à environ 30 kilomètres au sud de la propriété pour les plus larges d’entre eux et pour le chemin de la mine, le parement de la route est constitué des résidus du moulin de l’ancienne mine de St-Robert. De ce fait, les données issues de ce levé sont biaisées et ne sont pas exploitables.

Les levés radiométriques locaux nous ont, quant à eux, permis de distinguer les faciès intrusifs des faciès sédimentaires de la propriété. En effet, certaines roches sédimentaires de la propriété ont subi une silicification intense, rendant difficile de les caractériser. La radiométrie nous a donc permis de remédier à cela, à l’aide de la quantité de thorium présente dans les roches analysées : pour une roche intrusive, nous avons pu remarquer que la concentration en Th était très élevée par rapport à celle des roches sédimentaires (Tab. 5.2). La figure 5.38 ci-dessous montre ce phénomène.

Tableau 5.2 : Moyenne et écart-type des concentrations équivalentes en thorium (ppm) dans les dykes porphyriques et les roches sédimentaires déterminées à l’aide du radiomètre.

Type de roche	Moyenne – Th (ppm)	Écart-type – Th (ppm)
Dykes porphyriques	12,08	1,75
Roches sédimentaires	7,72	2,53

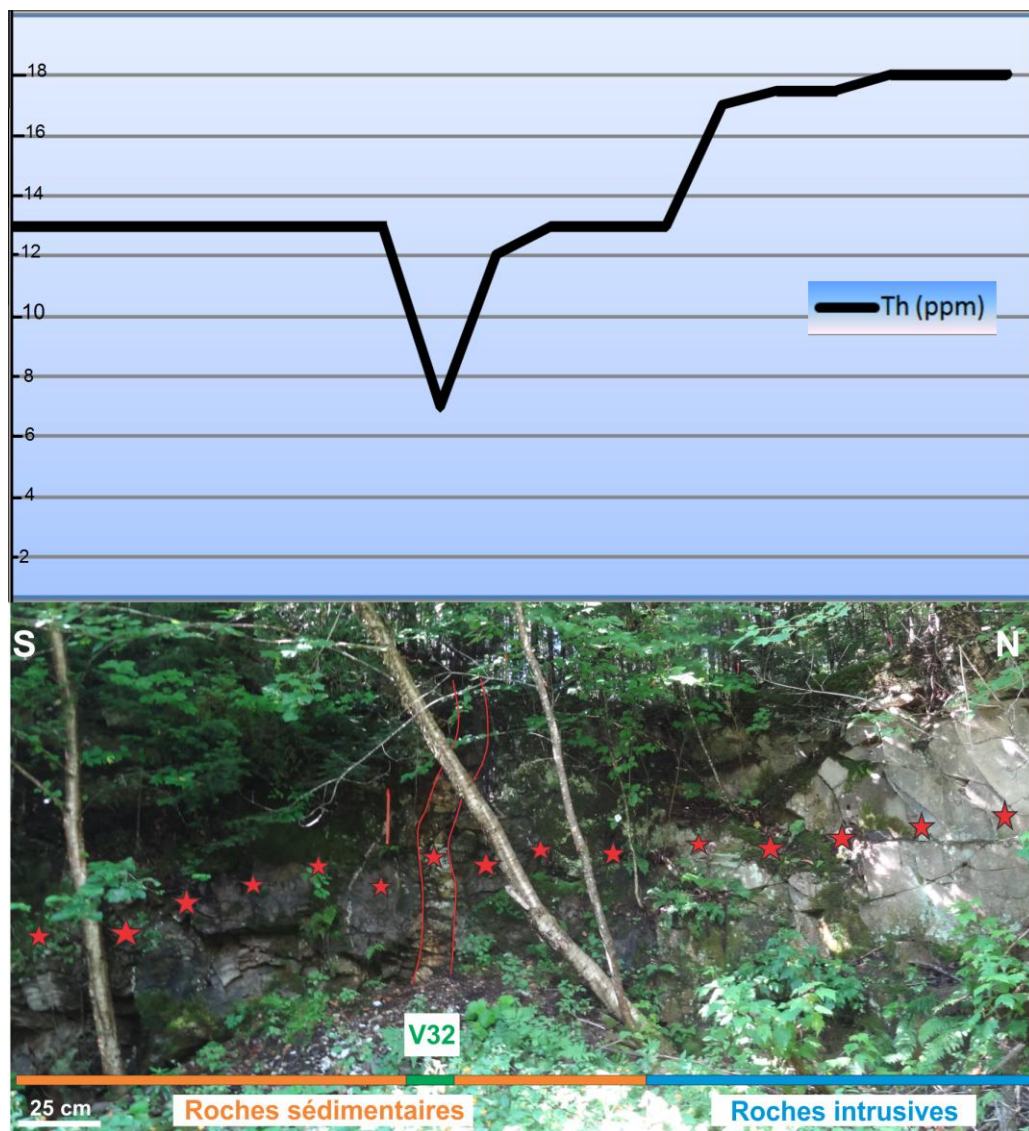


Figure 5.38 : Profil radiométrique en thorium en fonction de la lithologie du principal affleurement de la zone Centre. Les étoiles rouges correspondent aux lieux d'échantillonnage. Notons l'augmentation de la concentration en Th au niveau de l'intrusif ainsi que le pic négatif au niveau de la veine de quartz 32 minéralisée.

5.8 Conclusion du chapitre

La géochimie de la propriété de St-Robert est complexe de par le grand nombre d'unités lithologiques présentes et de minéralisations distinctes. L'étude géochimique des zones minéralisées a montré que les principales zones minéralisées contiennent de bonnes quantités de Pb, Zn, Ag, Bi, W et parfois Mo malgré le fait que l'échantillonnage s'est fait principalement en surface des veines. Ces bonnes valeurs sont encourageantes pour de prochains travaux d'exploration sur la propriété. De même que les résultats de la zone Centre, suggérant un gradient d'enrichissement en or vers l'est compatible avec la présence d'or détectée dans les anciens forages et aussi avec les résultats du levé pédogéochimique. Ces observations sont d'autant plus importantes que nous avons pu déterminer que les zones riches en or interceptées par les sondages de *St-Robert Metals* dans les années 1950 n'ont jamais été réinterceptées par la suite. De ce fait, il est très probable que cette zone riche en or existe bel et bien. L'étude géochimique des zones minéralisées a également montré que l'étain est absent du système, ce qui est important dans la description du type de gîte de la propriété St-Robert. En effet, bien que le type de gîte de la propriété s'appelle « gîte porphyrique à étain et tungstène », dans la majorité des cas, la présence des deux éléments dans un seul gisement est rarement observée.

L'étude lithogéochimique des roches sédimentaires indique que ces dernières sont surtout constituées de litharénites et de shales. La composition géochimique et la présence de grains anguleux dans les roches gréseuses suggèrent une provenance sédimentaire d'une source continentale relativement proche du lieu de sédimentation. De plus, les données lithogéochimiques démontrent que ce sont les roches gréseuses de la propriété qui sont les plus affectées par l'altération hydrothermale et la précipitation des sulfures. La faible perméabilité des shales ne semble pas avoir favorisé la percolation des fluides hydrothermaux. Ces roches argileuses ont certainement créé des barrières imperméables favorisant la focalisation des fluides dans les roches gréseuses.

Les diagrammes de discrimination d'environnements tectoniques de sédimentation suggèrent que la Formation de Frontenac se serait formée dans un environnement de type marge continentale active avec une possible contribution d'un arc continental. Ces sédiments proviendraient du démantèlement de roches ignées felsiques et sédimentaires quartzitiques probablement issues du massif protérozoïque de Chain Lakes situé à quelques kilomètres au sud de la propriété.

Les roches ignées felsiques constituent un groupe lithologique particulièrement important sur la propriété St-Robert en raison du rôle hautement probable du magmatisme felsique dans la mise en place des minéralisations. Les roches ignées de St-Robert sont toutes d'affinité calco-alcaline typique d'un contexte d'arc volcanique. Ce type d'environnement est favorable à la formation de gîte de type porphyrique à tungstène puisque ce type de gisement se retrouve généralement associé à des intrusions calco-alcalines. Ce constat s'applique également aux autres intrusions dévoniennes de la région. Les granitoïdes de St-Robert semblent peu altérer par rapport aux roches sédimentaires de la Formation de Frontenac ce qui s'accorde avec leur emplacement plus tardif.

CHAPITRE 6 : GEOPHYSIQUE

Le manque d'affleurements rocheux dans certaines parties de la propriété St-Robert et la présence d'un mort-terrain épais sur la propriété ont conduit les différentes compagnies détentrices des titres miniers à effectuer des travaux géophysiques afin d'avoir une idée plus précise de la géologie et de la localisation des zones sulfurées.

Dans ce chapitre, nous présenterons une synthèse des anciens levés ainsi que les résultats des nouvelles données géophysiques acquises sur la propriété en 2011 et 2012. Nous associerons les données géophysiques aux données pédogéochimiques et géochimiques afin d'en tirer des conclusions utiles à la compréhension des processus de mise en place des minéralisations. Enfin, nous discuterons de la géophysique régionale afin de tirer des conclusions sur le contexte géologique global de la propriété.

6.1 Travaux antérieurs

De nombreux travaux géophysiques ont été réalisés sur la propriété St-Robert.

Voici une liste des travaux géophysiques effectués jusqu'à présent :

- Deux levés de sismique réfraction : S.E.M. Prospecting Ltd. (1953), Géophysique G.P.R. International Inc. (1983).
- Trois levés de magnétisme au sol : Shichshocks Geotechnical Services Inc (1970), Géo-Auscultex International Itée (novembre 1981) et Edwin Gaucher et Associés inc. (décembre 1981).
- Quatre levés de polarisation provoquée : Schickshocks Geotechnical Services Ltd (1970), Edwin Gaucher & Associés (1981), Edwin Gaucher & Associés (1982) et Phoenix Geophysics Itée (1983).
- Trois levés électromagnétiques : Géo-Auscultex International (1980), Edwin Gaucher & Associés (1981), Campagne électromagnétique des MINES J.A.G Itée (1984).

En 1984, les MINES J.A.G. Ltée demandèrent à la compagnie Sagax Geophysique Inc de réexaminer l'ensemble des données géophysiques. Cette dernière recommandera de ne pas poursuivre l'utilisation de la polarisation provoquée spectrale ainsi que l'utilisation de méthode électromagnétique à très basses fréquences (EM-TBF) sur la propriété.

Enfin, dans le projet de réévaluation du potentiel minéral de la propriété, Koita effectuera en 2011 une compilation et une réinterprétation de l'ensemble de ces données, afin de mettre en valeur les principales zones d'intérêts issues de la géophysique ainsi que de fournir de nouvelles cartes géophysiques numériques. De plus, l'INRS a procédé en 2011 à des levés gravimétriques (CG5-SCINTREX), magnétométrique (GSM-19) et électromagnétique en domaine de fréquence (PROMIS 10). Des levés de résistivité électrique en mode d'imagerie tomographique (ABEM) et un levé audiomagnétotellurique (Zone GDP-32 et AMT) ont été réalisés en hiver 2012.

Depuis les travaux de Koita (2011), de nouvelles données de terrain ont été obtenues. Dans ce chapitre, nous allons donc ajouter ces observations de terrain aux cartes créées par Koita (2011) afin de tirer de nouvelles conclusions sur ce projet.

Pour plus de détail concernant les méthodes géophysiques utilisées, veuillez vous référer au mémoire de Koita (2011) et au rapport de Sagax Geophysique Inc (1984).

Pour une meilleure compréhension, nous recommandons aux lecteurs de se référer au tableau 6.4 récapitulatif.

6.1.1 Levé de sismique réfraction

6.1.1.1 Principe

La sismique est une méthode de prospection classique qui permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques. La sismique réfraction utilise la propagation des ondes le long des interfaces entre les différents niveaux géologiques. Cette méthode est le plus souvent utilisée pour des applications de génie civil et d'hydrologie. Elle permet d'estimer le modèle de vitesse et le pendage des couches. Elle est normalement utilisée pour étudier des cibles situées à une profondeur inférieure à 300 m.

La sismique réfraction a pour objectifs principaux la caractérisation physique des différentes unités du sous-sol (nature, compétence, ...) ainsi que l'estimation de leur profondeur. Cette méthode permet l'estimation de la profondeur au socle rocheux ainsi que celle de l'épaisseur des différentes unités quaternaires présentes au-dessus du socle rocheux.

La méthode de réfraction sismique peut être utilisée pour mesurer la vitesse sismique dans les roches, des sédiments et des sols et estimer la profondeur des surfaces de réfraction (exemples : interfaces till-sol, till-roches, etc., ...).

Plusieurs facteurs peuvent influencer les valeurs de vitesse sismique de matériaux géologiques. Par exemple, la porosité, la lithification (cimentation des roches sédimentaires), la pression (enfouissement des roches), et la saturation en fluides sont les principaux facteurs influençant les valeurs de vitesse des roches. Des processus d'atténuation peuvent aussi affecter des zones hautement hétérogènes comme des failles. En subsurface, les zones de weathering (intempérisme chimique) et le degré de saturation en eau des matériaux (sols, substrats quaternaires) influencent grandement les valeurs de vitesse des ondes sismiques.

La figure suivante montre une compilation des valeurs de vitesses sismiques observées dans différents matériaux géologiques (Fig. 6.1). Notez les faibles valeurs observées dans les alluvions, les sables secs et les zones de weathering et les valeurs intermédiaires observées dans les dépôts glaciaires (ex. tills). Les grès montrent normalement des vitesses sismiques de l'ordre de 2000 à 6000 m/s tandis que des roches ignées comme les granites ont des valeurs de l'ordre de plus de 5500 m/s.

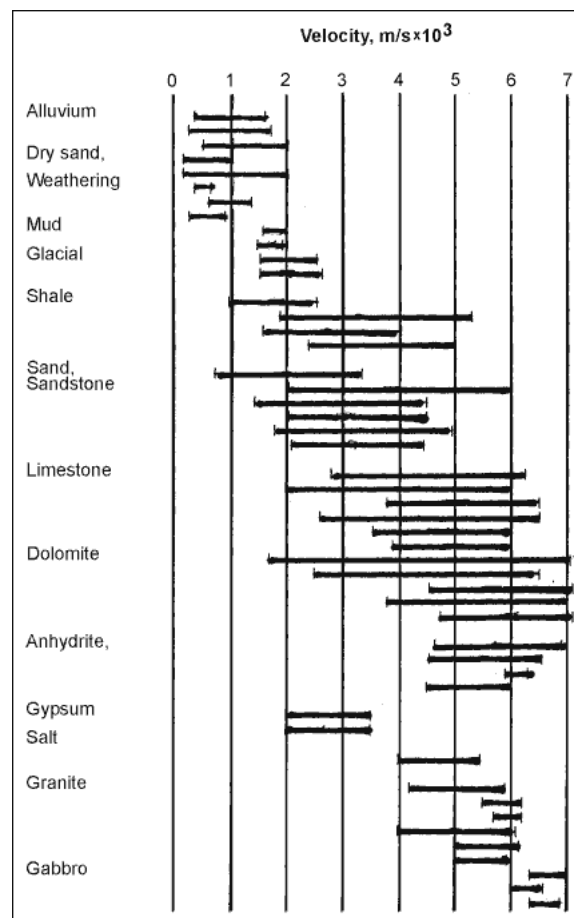


Figure 6.1 : Compilation des valeurs de vitesse sismique observées dans différents matériaux géologiques. Tirée de Sheriff et Geldart (1995).

Cette méthode requiert une source d'énergie sismique, habituellement une masse pour des profondeurs d'investigation inférieures à 15 mètres et des explosifs (poudre noire) pour une investigation jusqu'à 30 mètres.

Suite à l'impact de surface, les ondes sismiques pénètrent le mort-terrain et se réfractent à l'interface entre le mort-terrain et le substrat rocheux. Ces ondes réfractées atteignent la surface du sol et sont enregistrées par des géophones, plantés au sol et reliés par un câble à une unité d'acquisition. En réfraction sismique, les ondes de compression ou de cisaillement peuvent être utilisées. En exploration minière, les ondes de compression sont le plus souvent utilisées et en géotechnique les ondes de cisaillement sont fréquemment utilisées.

La figure 6.2 montre le principe de la méthode de réfraction sismique. Sur un diagramme temps vs distance, la pente des différents segments est l'inverse de la vitesse sismique de l'unité (ex. V_0).

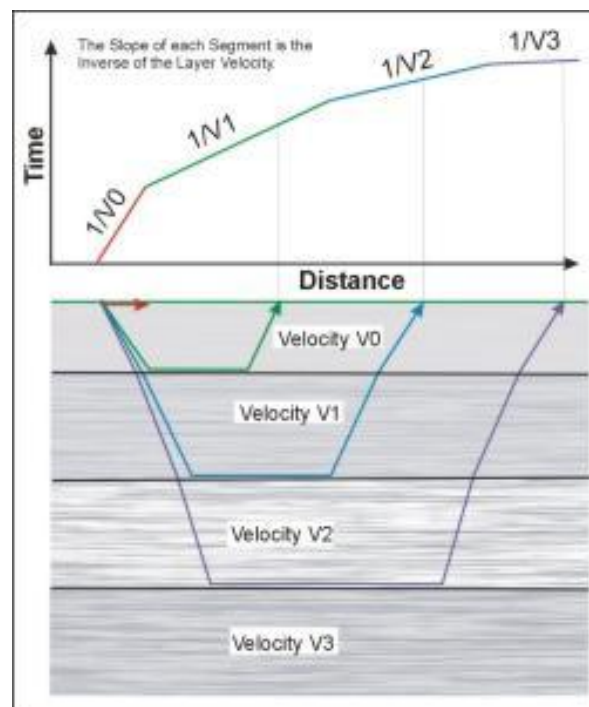


Figure 6.2 : Principe de la méthode de réfraction sismique. Tirée du site de la CFLHD (Central Federal Lands Highway Division). <http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/SubsurfaceChartacter/613MappingLithology%281%29.cfm> (consulté le 3 septembre 2012).

Les données utilisées dans cette étude ont été extraites par Koita (2011) à partir d'anciens plans et de sections fournies par Géophysique GPR (1983). Les données numériques ont par la suite été traitées sur Oasis Montaj afin de produire des cartes des valeurs de vitesse sismique et d'épaisseur au socle rocheux interpolées par krigeage.

6.1.1.2 Résultats et interprétations

Sur la figure 6.3, montrant la variation de la vitesse de propagation des ondes sismiques, nous pouvons tout d'abord noter que le milieu est hétérogène avec des valeurs variant de 5628,8 m/s pour les matériaux les plus compétents à 3878,8 m/s. De plus, la carte montre deux principales zones de faiblesse présentant une nette diminution de la vitesse de propagation des ondes sismiques. Nous avons interprété ces couloirs comme étant des failles.

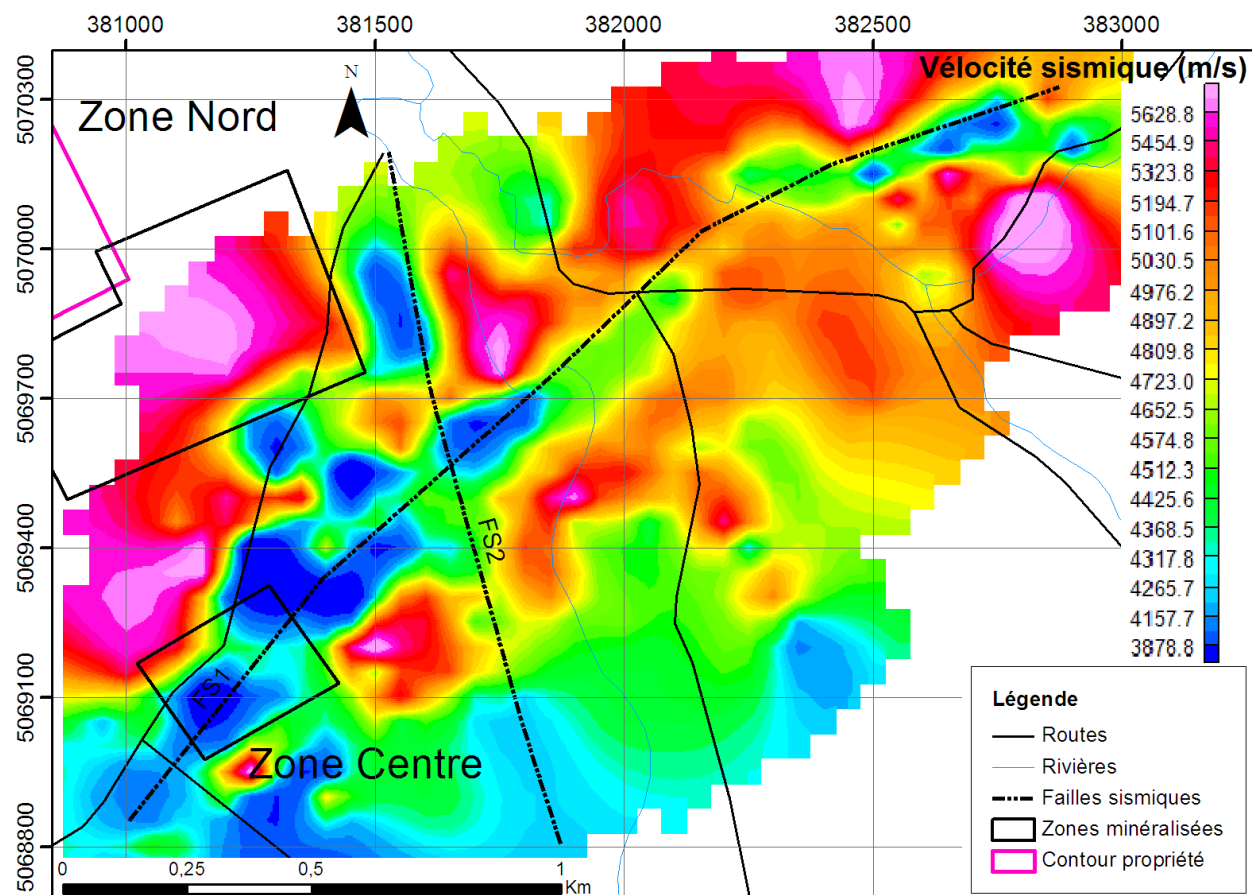


Figure 6.3 : Variabilité spatiale des valeurs de vitesse sismique (m/s). Interpolation par krigeage. Projet St-Robert, INRS-ETE. Les couloirs F.S.1 et F.S.2 sont interprétés comme des failles.

La figure 6.4 montre la superposition des données géologiques à la carte des valeurs de vitesse sismique. Un point intéressant à remarquer est que la faille sismique F.S.1 (NE-SO) passe directement sur l'affleurement principal de la zone Centre. Il est probable que les fluides minéralisateurs responsables de la formation des zones minéralisées de la zone Centre aient circulé par cette faille. De plus cette même faille passe à proximité d'un affleurement situé à l'est de la rivière du Loup où nous avons observé la présence de veines minéralisées en pyrite, galène et scheelite (indice découvert en 2011). Il est possible que cet indice minéralisé ait hérité des mêmes caractéristiques minéralogiques que la zone Centre. De ce fait, nous recommandons une étude approfondie de cette partie de la propriété.

Nous pouvons également noter qu'au niveau de l'intrusion sous-jacente à la propriété, la vitesse de propagation des ondes sismiques augmente indiquant bien un changement de milieu. De même au nord-ouest du levé, la vitesse sismique est élevée et nous avons retrouvé de nombreux dykes quartzo-feldspathiques dans cette région.

Toutefois, pour ce secteur, il semble que l'épaisseur de mort-terrain soit faible ce qui expliquerait en partie les hautes vitesses de propagations des ondes sismiques.

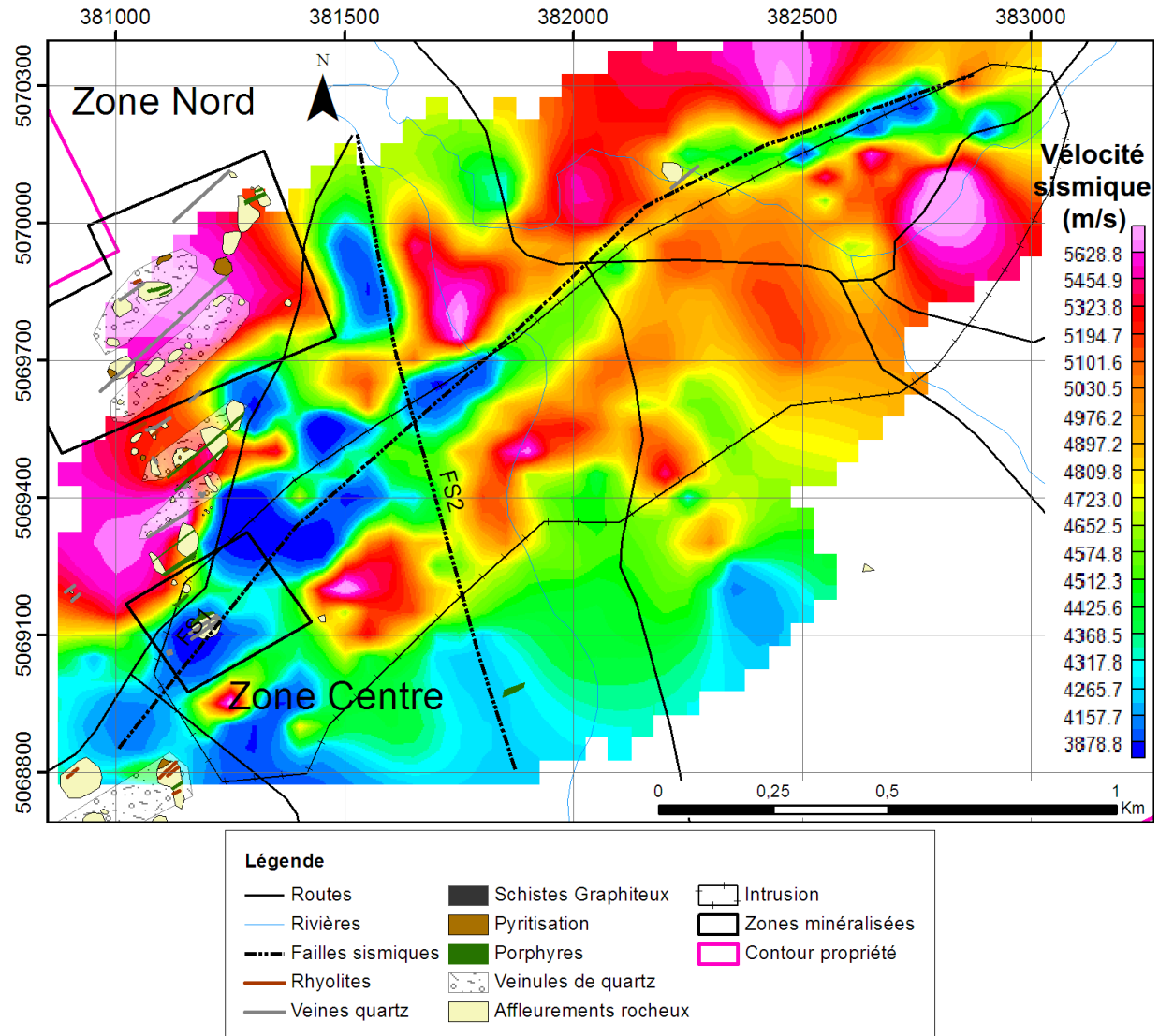


Figure 6.4 : Carte montrant la variabilité de la vitesse de propagation des ondes sismiques et les différentes lithologies observées sur la propriété. Projet St-Robert, INRS-ETE.

La figure 6.5 montre la variabilité spatiale de la profondeur du socle par rapport à la surface et nous renseigne donc sur l'épaisseur de mort-terrain. Nous pouvons tout d'abord remarquer que l'épaisseur de mort-terrain varie de quelques mètres à une soixantaine de mètres. De plus, on peut noter la présence de deux grands domaines :

- Le domaine 2 situé sur les zones Nord et Centre correspondant à de grandes épaisseurs de mort-terrain. Ce domaine correspond au flanc est de la montagne des Mines. Notez que la préservation d'une aussi grande épaisseur de mort-terrain sur le sommet de la montagne est surprenante.

- Le domaine 1 situé à l'est de la rivière du Loup présente de faibles épaisseurs de mort-terrain. Ceci peut s'expliquer par la présence de la rivière du Loup et du petit ruisseau Caouette qui ont largement érodé le mort-terrain. Pour expliquer l'importance de l'érosion des dépôts quaternaires dans ce secteur, il faut se mettre en contexte du haut niveau des rivières lors de la dernière grande déglaciation continentale.

De plus, lors des forages effectués dans les années 1950 et 1980, la grande épaisseur de mort-terrain au niveau de la zone Centre avait posé beaucoup de problèmes techniques.

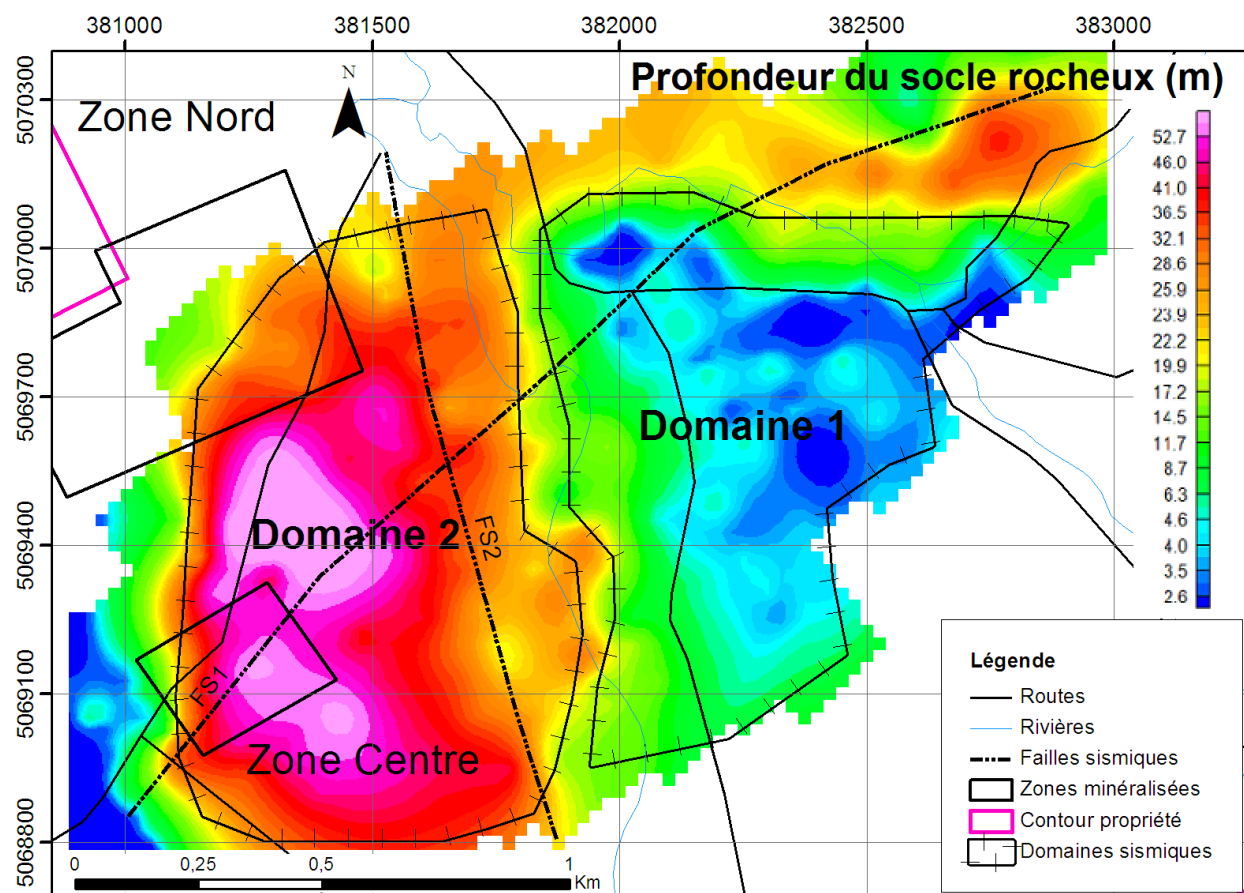


Figure 6.5 : Variabilité spatiale de la profondeur du socle rocheux. Interpolation par krigeage.
Source : Projet St-Robert, INRS-ETE.

6.1.2 Levé magnétométrique

6.1.2.1 *Principe*

Un magnétomètre mesure le champ magnétique ambiant. Ce dernier correspond à la somme du champ magnétique terrestre et du champ généré par les matériaux présents dans le champ de détection. En exploration, la magnétométrie est utilisée pour la recherche de minéralisations associées à des minéraux magnétiques. En effet, tout objet plongé dans un champ magnétique génère un nouveau champ magnétique proportionnel au premier : c'est ce qui s'appelle l'aimantation induite. Cette relation se traduit par l'égalité suivante (Allard et Bois, 1999) :

$$B = \mu \times H$$

H est le champ magnétique initial, B est l'aimantation induite et μ est la susceptibilité magnétique du matériau.

La susceptibilité magnétique correspond à la facilité qu'ont les roches à devenir magnétiques ou polarisées sous la présence d'un champ magnétique externe. Elle est principalement contrôlée par la proportion de minéraux ferromagnétiques contenue dans les roches. La magnétite est le principal minéral affectant la susceptibilité magnétique des roches, mais en contexte de minéralisations sulfurées, des phases comme la pyrrhotine peuvent fortement contribuer à rehausser les valeurs de susceptibilité magnétique. Les roches basiques riches en magnétite et titano-magnétite montrent de hautes valeurs de susceptibilité magnétique ce qui explique les hautes valeurs du champ magnétique total observées lorsque ces roches sont présentes sur le terrain. Les granitoïdes injectés dans les roches sédimentaires (ex. St-Robert) peuvent être associés à la présence de proportions importantes de magnétite ce qui se traduit par de forts contrastes sur les cartes des données magnétiques.

Notez que les valeurs de susceptibilité magnétique peuvent varier beaucoup dans un même groupe de roche et des facteurs secondaires comme l'altération hydrothermale, le métamorphisme de contact et le weathering peuvent les modifier.

En général les roches sédimentaires sont celles montrant les plus faibles valeurs de susceptibilité magnétique et les roches ignées celles montrant les plus hautes valeurs.

Le tableau suivant présente les valeurs de susceptibilité magnétique des différents types de minéraux et roches communément observés (Tab. 6.1). Notez les faibles valeurs pour la sphalérite et la pyrite et les hautes valeurs pour la magnétite et l'ilménite.

Tableau 6.1 : Valeurs de susceptibilité magnétique pour différents types de matériaux. Tirées de <http://gretchen.geo.rpi.edu/roecker/AppGeo96/lectures/mag/rocksus.html> (consulté le 2/09/2012)

Matériaux	Susceptibilité x 10³ (SI)
Air	~0
Quartz	-0,01
Sel (roche)	-0,01
Calcite	-0,011
Sphalérite	0,4
Pyrite	0,05 - 5
Hématite	0,5 - 35
Ilménite	300 – 3 500
Magnétite	1 200 – 19 200
Calcaires	0 - 3
Grès	0 - 20
Shales	0,01 - 15
Schistes	0,3 - 3
Gneiss	0,1 - 25
Ardoises	0 - 35
Granite	0 - 50
Gabbro	1 - 90
Basalte	0,2 - 175
Péridotite	90 - 200

Dans cette étude, nous avons utilisé les données acquises lors du levé magnétométrique au sol effectué par la compagnie Edwin Gaucher & associés (1981). Ce levé couvre l'ensemble de la propriété et a été réalisé à l'aide de quatre magnétomètres à précession nucléaire mesurant l'intensité du champ total (URTEC UM-220, BARRINGER RESERCHBGM-112, Geometrics G-816, Geometrics G-826) et par un appareil MR-10 de Canadian Mining Geophysics couplé à un magnétomètre Geometrics G-816 pour faire la correction diurne des données.

En plus de la correction diurne, les données ont été corrigées par la méthode de réduction aux pôles des valeurs du champ magnétique total. Ce traitement consiste à éliminer les distorsions du champ causées par l'inclinaison du champ magnétique terrestre.

Le levé magnétométrique a été effectué en mode station à tous les 15 mètres le long des 46 lignes orientées NO-SE qui avaient été tracées dans les années 1980 pour les travaux d'exploration (Fig. 6.6).

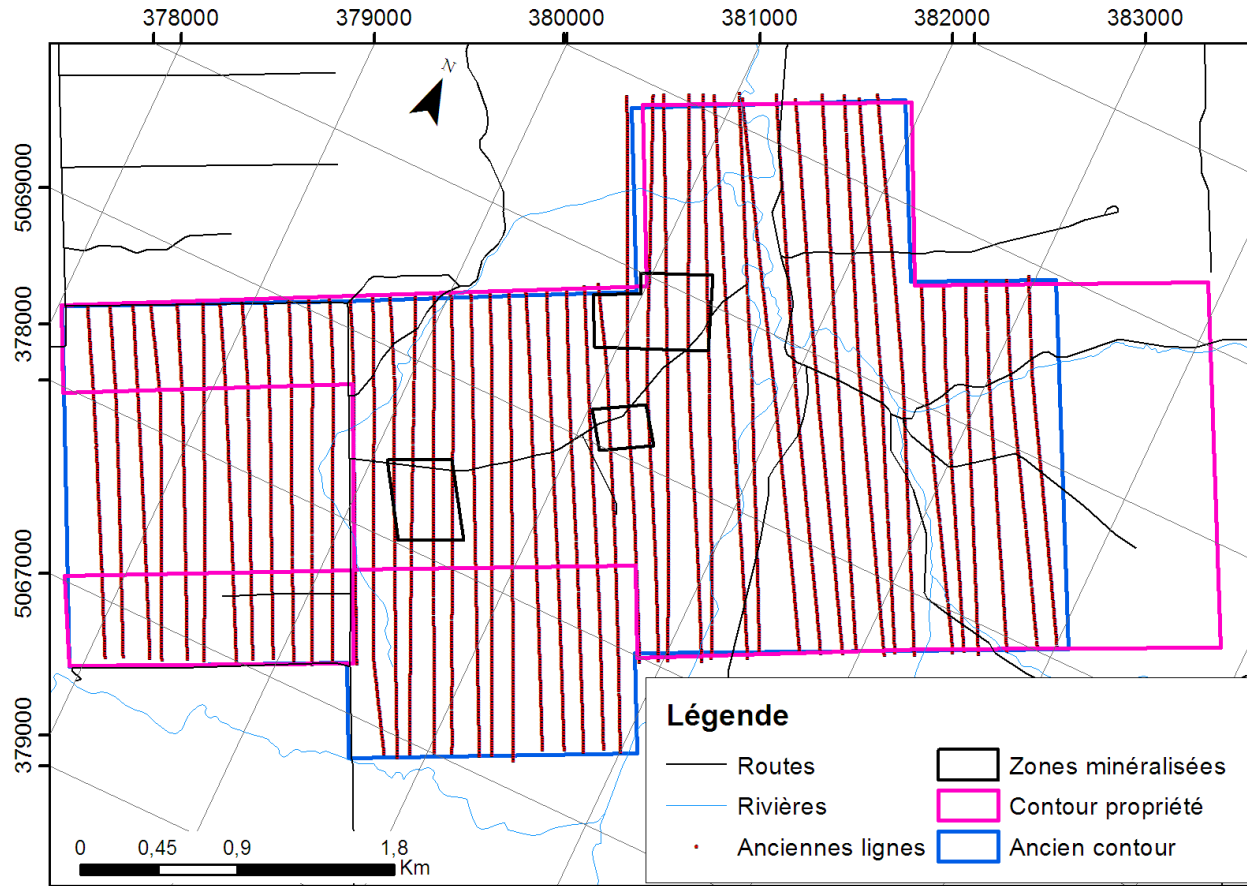


Figure 6.6 : Grille de mesure des levés magnétométriques et électromagnétiques.

Nous avons numérisé les données à partir des plans fournis par Edwin Gaucher & Associés pour ensuite les kriger à l'aide du programme *Kriging* du logiciel *ArcGIS* afin d'obtenir des cartes de variabilité du champ magnétique total. La détermination des coordonnées UTM pour chaque point de mesure s'est fait à l'aide de la numérisation et du géoréférencement des cartes d'archives grâce au programme *Georeferencing* du logiciel *ArcGIS*. Compte tenu de la qualité des cartes d'archives, la localisation absolue des anomalies obtenues n'est pas parfaite.

6.1.2.2 Résultats et interprétations

Nous avons mesuré les valeurs de susceptibilité magnétique pour les roches intrusives et sédimentaires ainsi que pour les veines de quartz minéralisées de l'affleurement principal de la zone Centre. Ces valeurs sont présentées en annexe E-1. Globalement, nous avons pu noter que les échantillons de roches de la propriété de St-Robert ont des valeurs de susceptibilité magnétique variant entre 0 et 9×10^{-3} (SI) (Fig. 6.7).

Nous avons remarqué que les roches sédimentaires montrent des valeurs de susceptibilité magnétique systématiquement plus faibles que les roches intrusives. De plus, l'échantillon ayant la susceptibilité magnétique la plus élevée correspond au contact intrusif-encaissant mais également à l'éponte de la veine minéralisée V32. Notez d'ailleurs que cette dernière ne présente pas de valeurs de susceptibilité magnétique élevées.

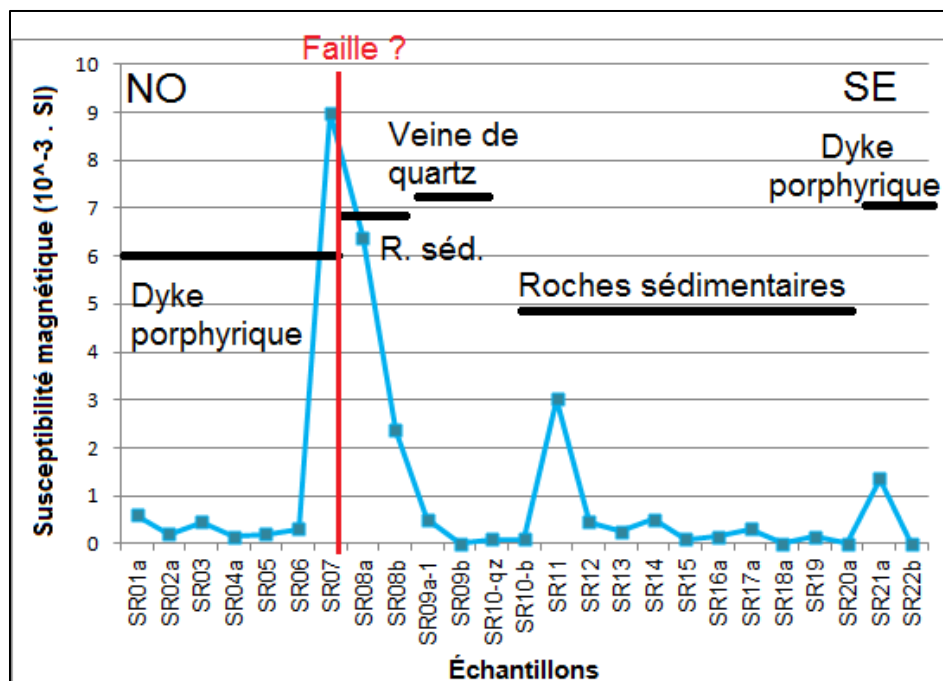


Figure 6.7 : Profil des valeurs de susceptibilité magnétique mesurées le long de l'affleurement principal de la zone Centre.

Au niveau de la propriété, le champ magnétique total varie de 56 757 nT à 56 839 nT. Les zones considérées comme anormales sont caractérisées par des valeurs moyennes de l'ordre de 56 777 nT (Fig. 6.8).

La carte de la figure 6.8 montre des anisotropies à différentes échelles suggérant une géologie complexe. Premièrement, une anomalie magnétique kilométrique constituée d'un haut magnétique est présente dans la partie nord-ouest de la carte. Cette anomalie semble reliée à la présence d'une masse intrusive granodioritique comme le suggère une forte altération potassique et argilitique, la présence de cornéennes et la présence de nombreux dykes porphyriques quartzo-feldspathiques situés le long de cette anomalie. Pour simplifier la présentation des données dans ce mémoire, nous avons décidé de nommer cet intrusif potentiel « intrusif de St-Robert ». Sur la carte du champ total (après réduction au pôle), Koita (2011) a représenté les axes des principales anomalies magnétiques.

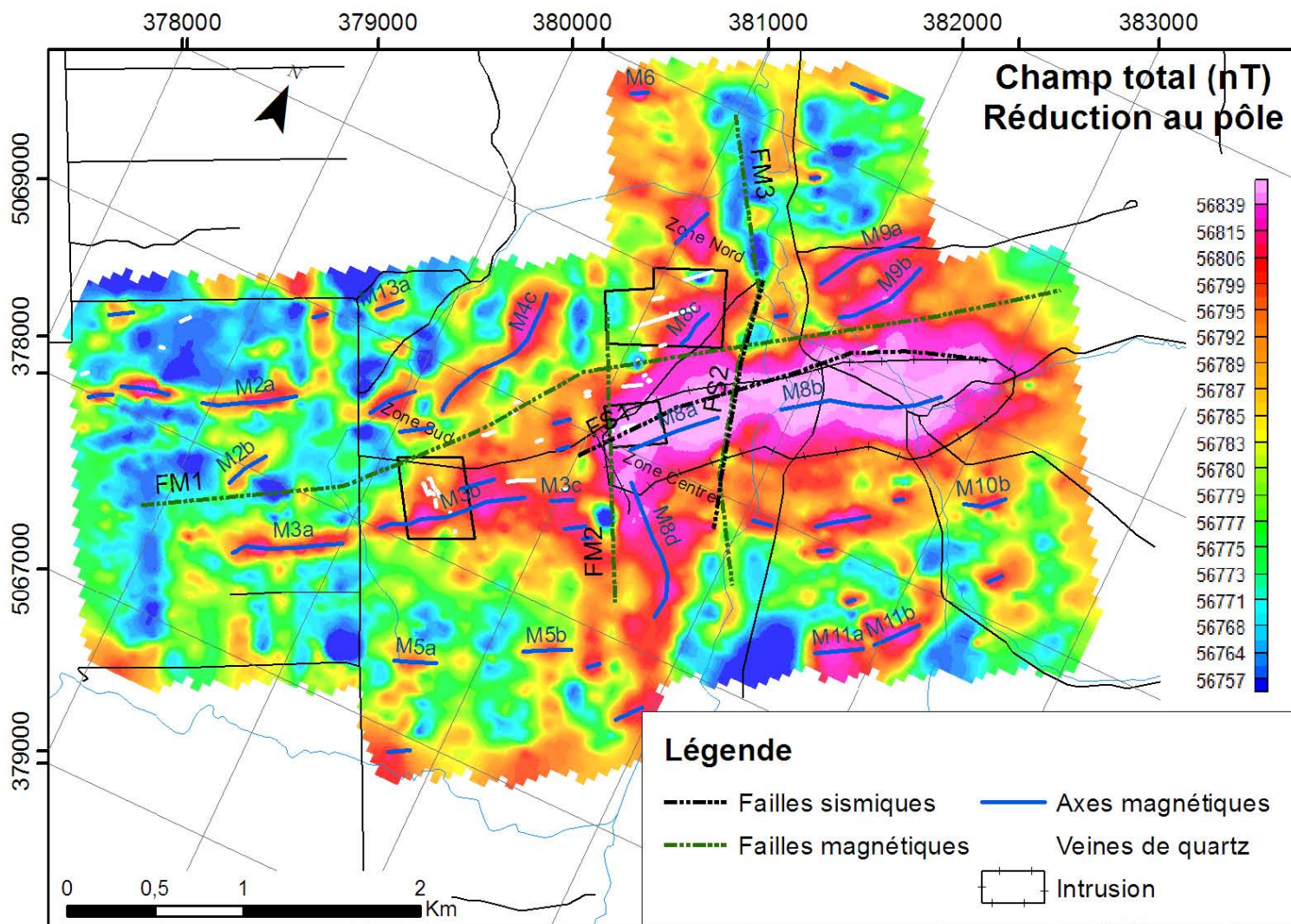


Figure 6.8 : Carte d'interpolation par krigeage des données du champ magnétique total (après réduction au pôle). Projet St-Robert, INRS-ETE. Modifiée de Koita (2011). Le tracé des *failles magnétiques* est issu de la carte de la dérivée verticale première du champ magnétique total.

Tout d'abord, nous pouvons noter la présence d'une zone anormale principale (anomalies M8a et M8b). Sur la propriété, nous avons pu observer des cornéennes ainsi qu'une altération potassique et argilique suggérant la présence d'un corps intrusif sous-jacent. De plus, la présence de nombreux dykes porphyriques quartzo-feldspathiques situés le long de cette anomalie supporte également cette interprétation. La zone anormale principale correspondrait donc à l'intrusion sous-jacente de St-Robert. Les profils des données du champ magnétique total ci-dessous montrent la nette augmentation du champ magnétique correspondant à l'anomalie créée par l'intrusion (Fig. 6.9). Notez que la pente abrupte de la courbe à gauche de l'anomalie (vers le NO) pourrait correspondre à la discontinuité magnétique FM1 observée sur la carte de la figure 6.8. Cette discontinuité est interprétée comme étant une faille.

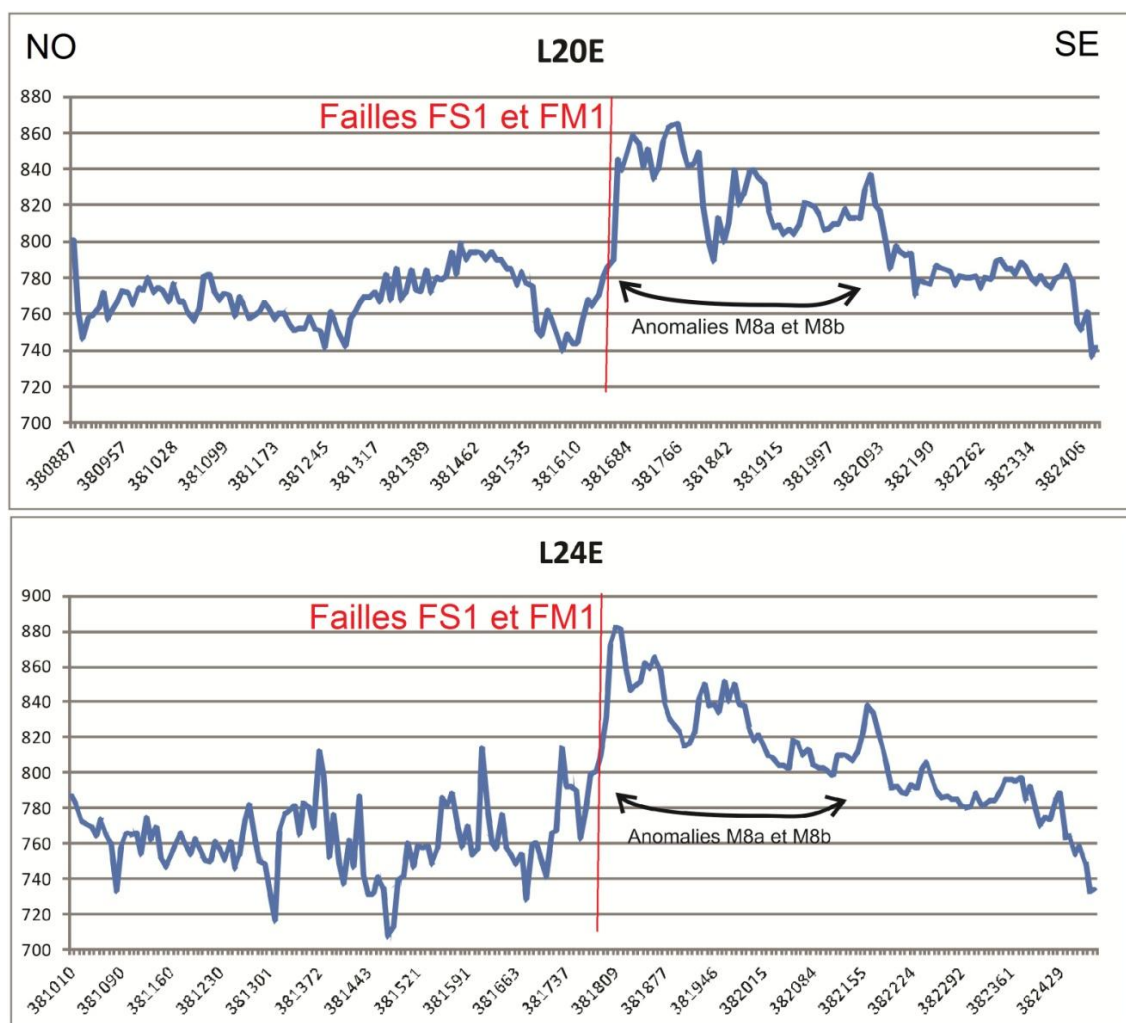


Figure 6.9 : Profil du champ magnétique total en fonction de la distance. La localisation des deux lignes se trouve en figure 6.10. FS1 correspond à la faille déduite à partir des valeurs d'anisotropie sismique. FM1 correspond à la même faille déduite à partir de l'anisotropie des données magnétiques.

La carte ci-dessous montre la localisation des lignes représentées sur la figure 6.9.

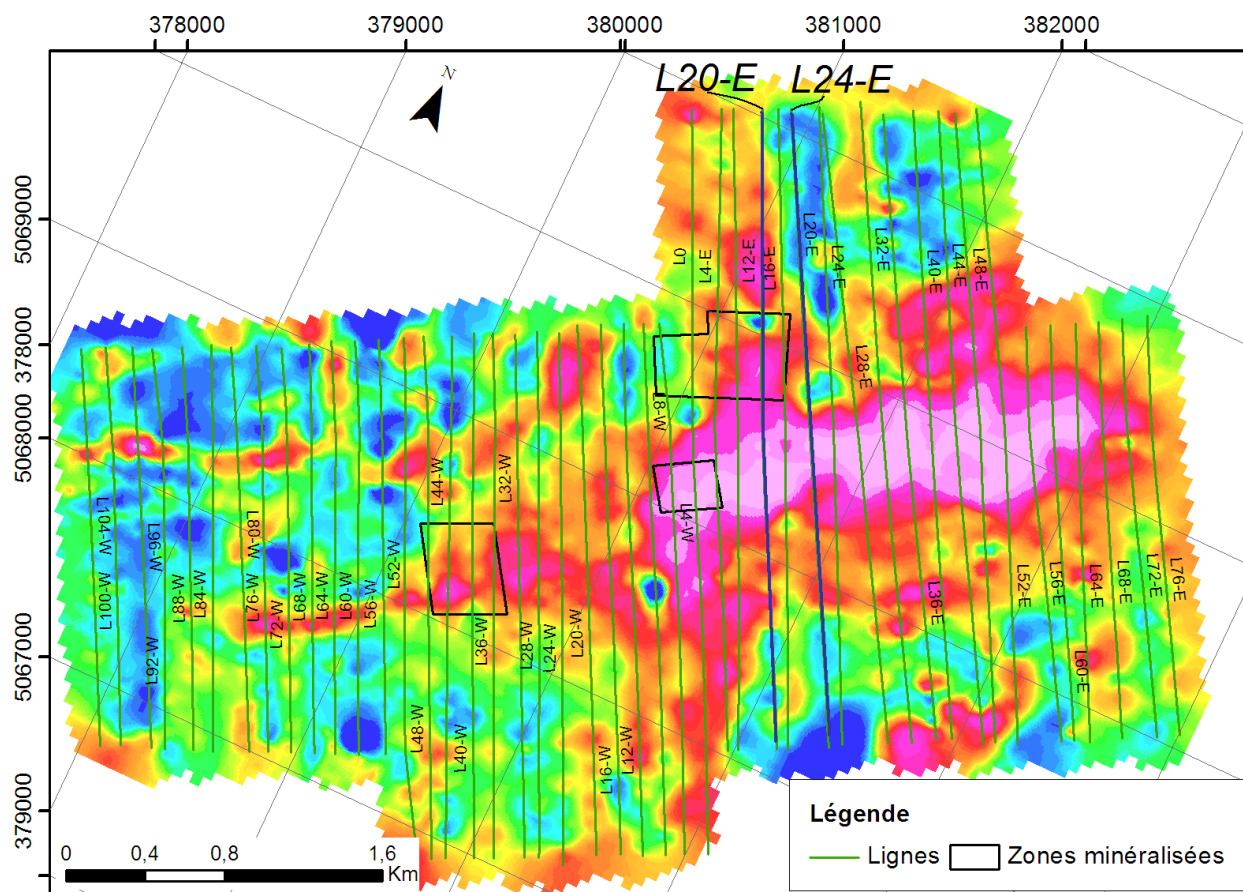


Figure 6.10 : Localisation des lignes 20E et 24E sur un fond représentant les données du champ magnétique total.

À l'aide de la dérivée verticale première du champ magnétique totale (Fig. 6.11), nous avons pu déterminer les tracés des discontinuités magnétiques correspondant vraisemblablement à des failles (dans le texte et sur les figures, ces failles présumées sont identifiées comme *failles magnétiques*). La *faille magnétique* orientée environ N-S la plus à l'est (FM3) chevauche parfaitement la *faille sismique* (FS2) déterminée plus tôt, confirmant la présence d'une faille tardive. La dérivée première verticale est un traitement mathématique qui permet d'améliorer la résolution spatiale de la carte du champ magnétique total. De ce fait, cette technique est fréquemment utilisée pour préciser la position des contacts entre différentes unités géologiques. (Blakely et Simpson, 1986; Richer-LaFlèche, 2010). Notez que la réalisation et le géoréférencement de ces cartes ont été faits par association de points similaires entre la carte de la propriété St-Robert géoréférencée et la carte des données magnétiques non géoréférencées (par exemple, des habitations, ou des intersections de chemin). De ce fait, il existe un décalage entre les stations des données magnétiques et les vraies stations.

En considérant cet aspect, il est hautement probable que les failles FM1 et FS1 soient en réalité qu'une seule et même faille. Enfin, d'après la figure 6.11, nous pouvons déterminer que l'intrusion de St-Robert ferait environ 2,5 kilomètres de long sur 500 mètres de large.

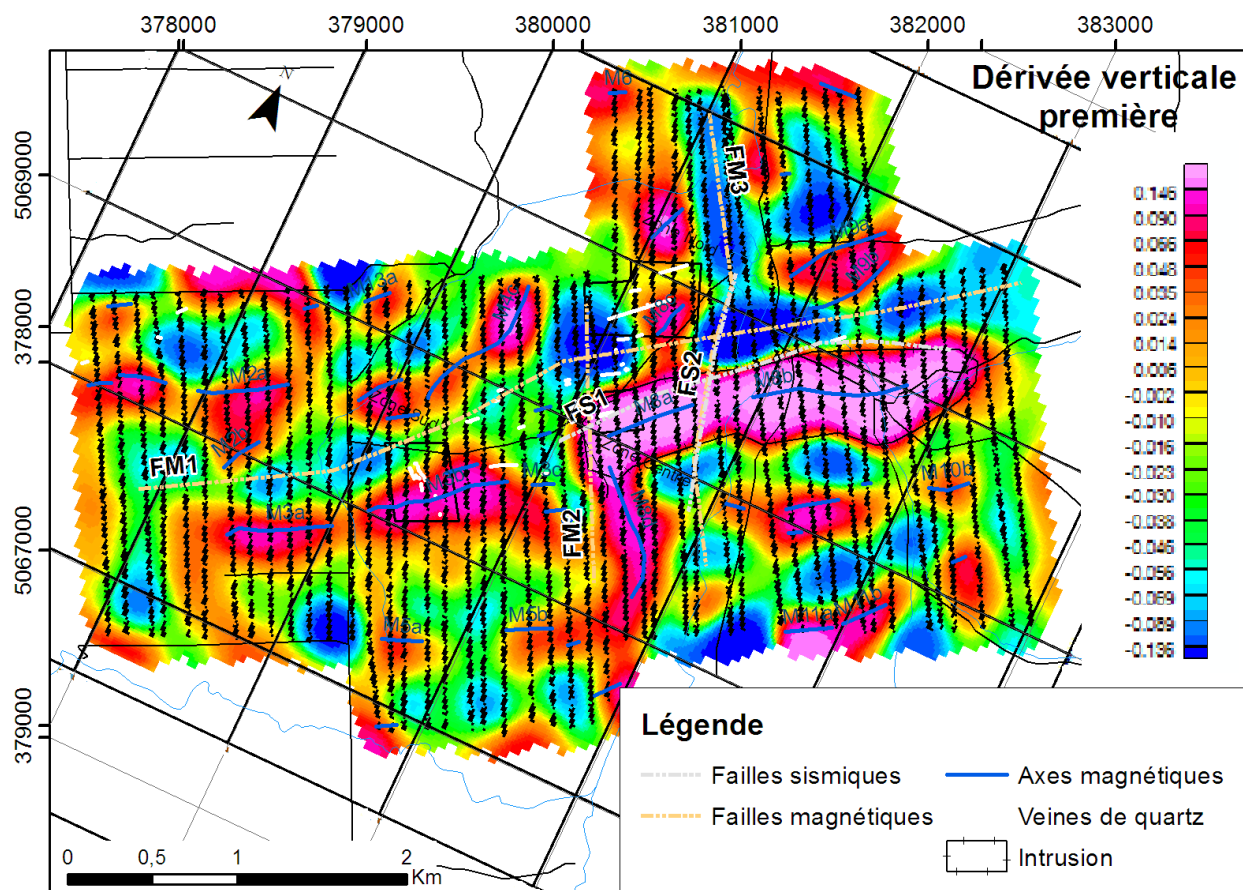
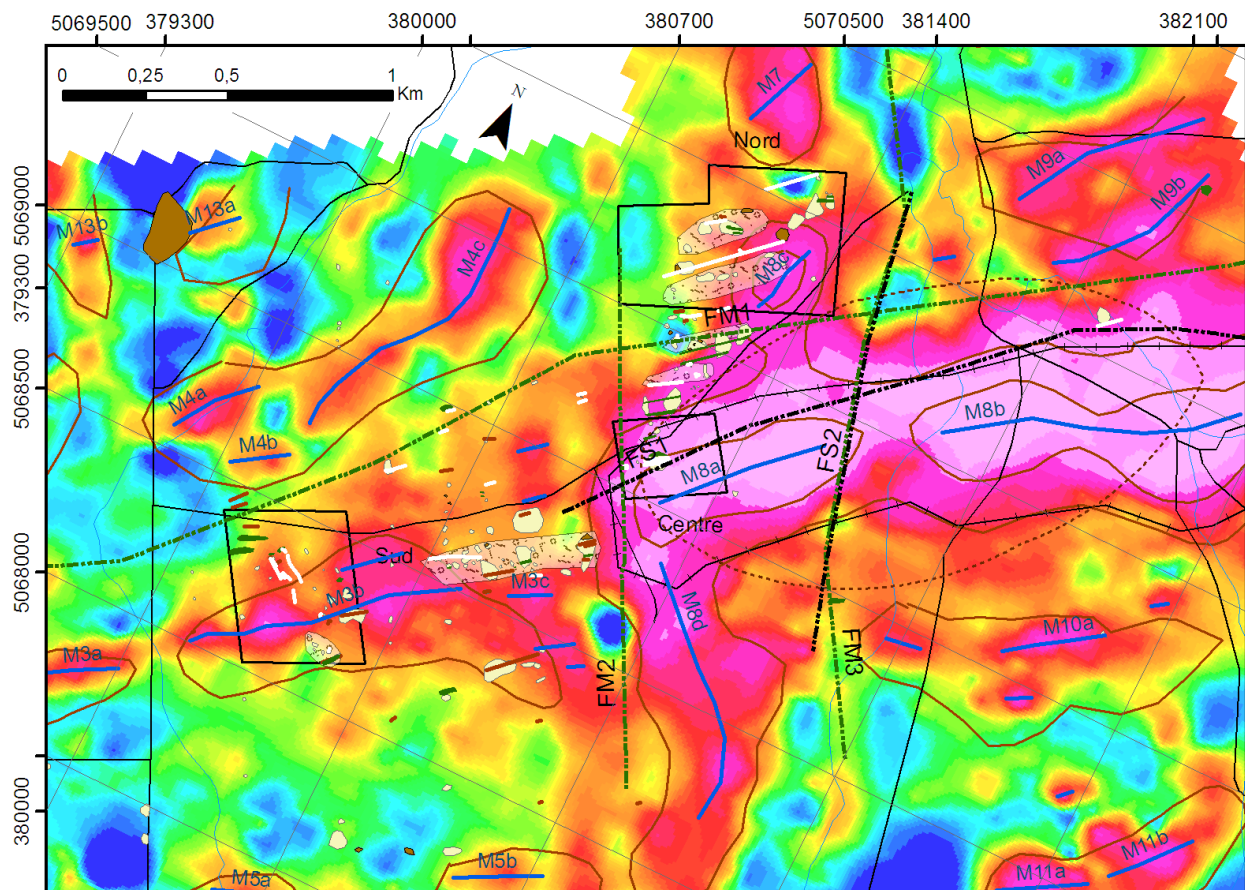


Figure 6.11 : Carte d'interpolation par krigeage de la dérivée verticale première du champ magnétique total. Modifiée de Koita (2011).

À l'aide de la méthode d'Euler, les profondeurs des sources des anomalies magnétiques ont été calculées (annexe E3). Le choix de l'indice structural n est très important pour l'interprétation des résultats de cette méthode. En effet, cet indice est fonction de la géométrie des corps à l'origine des anomalies magnétiques. Pour un contact géologique, la valeur de l'indice structural la mieux adaptée est 0; pour un dyke ou un filon mince, il est préférable d'utiliser une valeur d'indice structural de 1; pour un cylindre horizontal ou vertical, par exemple un conduit, la valeur de l'indice structural la mieux adaptée est 2 et pour un corps sphérique 3. De ce fait, nous avons surtout utilisé dans le cas de St-Robert une valeur d'indice structural de 1, car la majorité des minéralisations se trouve dans des filons de quartz ou des dykes.

En général, les profondeurs des sources d'anomalies magnétiques sont plus élevées que la profondeur verticale maximale de la majorité des forages effectués sur la propriété St-Robert. Par exemple, les estimations de profondeur par la méthode d'Euler varient entre 50 et 170 mètres de profondeur. Les profondeurs verticales de forage ne dépassent généralement pas les 80 mètres de profondeur pour les zones Sud et Nord. Dans le périmètre de l'intrusion, les profondeurs estimées par la méthode d'Euler sont en moyenne de 150 mètres (n=1). Ceci suggère que la masse intrusive est recouverte d'une relativement faible épaisseur de roches sédimentaires.

D'autres anomalies magnétiques plus petites mais néanmoins dignes d'intérêt sont présentes un peu partout sur la propriété. Dans le but de corrélérer ces anomalies aux observations géologiques faites sur le terrain, nous avons présenté sur la figure 6.12 les différentes anomalies magnétiques superposées à la carte géologique établie.



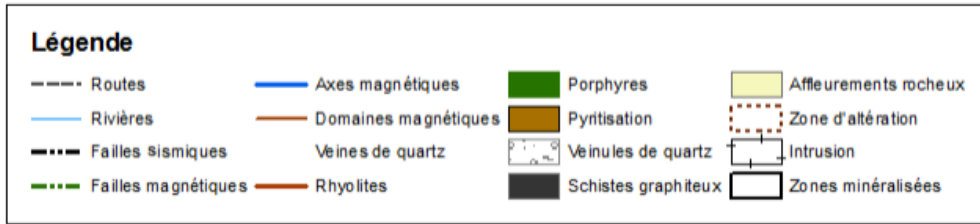


Figure 6.12 : Carte montrant les principaux domaines magnétiques ainsi que les éléments géologiques observés sur le terrain.

Le **domaine anomalique M4**, au nord-ouest de la figure 6.12, se situe au niveau de la zone d'intérêt potentiel I du levé pédogéochimique. Cette zone est enrichie en argent et bismuth. Le sondage J13 interceptant ce domaine montre la présence de roches intrusives ayant subi une oxydation (hématisation) et contenant des veinules de quartz minéralisées en galène, scheelite et possiblement molybdénite (Fig. 6.13). De plus, dans le même sondage, en profondeur, quelques veines de quartz minéralisées en pyrite, galène et sphalérite ont été observées. Sur le terrain, le mort-terrain est relativement épais et seuls des blocs erratiques ont été observés en surface.

Le **domaine anomalique M11**, situé au sud-est de la propriété, est intercepté par le sondage J4. Ce dernier contient un important dyke rhyolitique qui est traversé par une zone riche en veines de quartz minéralisées. Les 29 analyses en Au et Ag n'ont cependant pas décelé de valeurs intéressantes. Cependant, l'estimation de la profondeur par la méthode d'Euler ($n=1$) suggère une source d'anomalie magnétique présente à environ 90 mètres de profondeur tandis que le forage J4 n'atteint que 75 mètres de profondeur verticale (Fig. 6.13). D'autres forages devraient donc être envisagés pour évaluer le potentiel de cette anomalie magnétique.

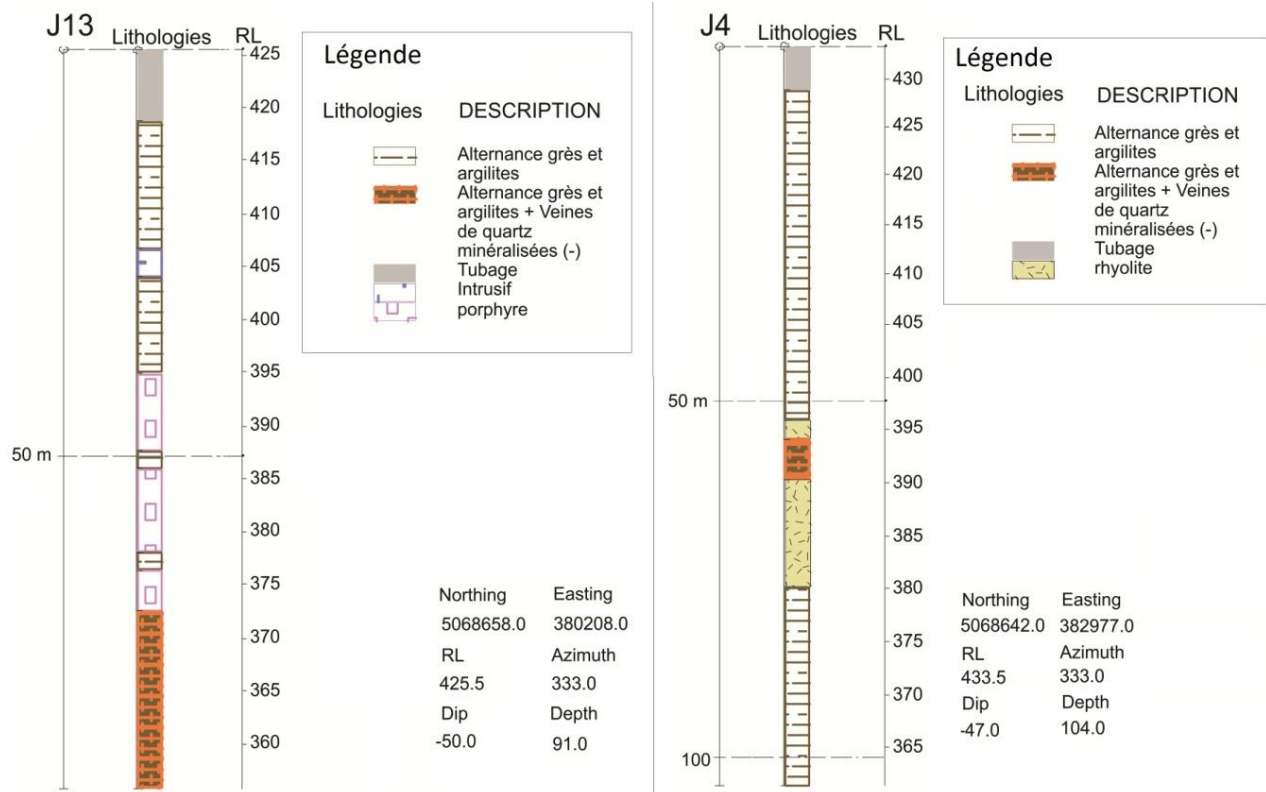


Figure 6.13 : Représentation des relevés des forages J4 et J13.

Le **domaine anomalique M3** s'étend sur plus de 1,5 kilomètre et passe par la zone minéralisée Sud. Ce domaine se termine près de la faille FM2 et correspond à une zone où l'on retrouve beaucoup de dykes quartzo-feldspathiques et rhyolitiques sur le terrain et dans les forages. En plus de la zone minéralisée Sud contenant beaucoup de veines de quartz, ce domaine comprend également de nombreuses autres veines et veinules non minéralisées aperçues sur le terrain. Cette zone a donc subi une activité hydrothermale importante.

Le **domaine anomalique M5** est constitué des deux sous domaines M5a et M5b et est situé au sud de la propriété. Peu d'affleurements ont été observés dans cette zone et aucun forage n'y a été réalisé. Toutefois, sur les quelques affleurements un peu plus au nord, nous avons observé une intense pyritisation.

Le **domaine anomalique M9** est situé au nord-est de la propriété dans une zone avec une importante épaisseur de mort-terrain. Aucun forage ne le traverse, mais nous avons pu observer sur le terrain un dyke porphyrique.

Le **domaine anomalique M7** est situé à environ 200 mètres de la zone Nord et de ce fait, il peut présenter un intérêt pour l'exploration. Sa forme évasée indique une source relativement profonde et selon l'estimation par la méthode d'Euler cette source magnétique serait à environ 115 mètres de profondeur ($n=1$).

Les **anomalies magnétiques M8c et M8d** sont vraisemblablement reliées aux anomalies magnétiques M8a et M8b associées à l'intrusion St-Robert. L'anomalie M8c se situe au niveau de la zone minéralisée Nord. De nombreux dykes intrusifs sont observés dans cette zone. Aucun forage et aucun affleurement ne sont présents au niveau de l'anomalie M8d.

Cependant, cette anomalie peut être importante étant donné qu'elle est reliée aux anomalies magnétiques des zones Centre et Nord. De plus, cette anomalie est bordée vers l'ouest et l'est par les failles FM2 et FM3-FS2 qui augmentent son importance.

Le **domaine anomalique M13** est situé au nord-ouest de la propriété et sur le terrain, nous avons pu observer une intense pyritisation sur un affleurement de roches sédimentaires d'environ trois mètres de long sur un mètre de large (Fig. 3.19 et 6.14). Le sondage J14 ne passe pas très loin au sud et contient une zone riche en veines de quartz qui a été analysée juste pour l'or. Aucune valeur intéressante n'est ressortie.



Figure 6.14 : Affleurement de roches sédimentaires intensément pyritisées.

Le **domaine anomalique M10** est situé à environ 500 mètres au sud de l'intrusion de St-Robert et des failles FS2 et FM3. Il peut donc être intéressant. De plus, il se trouve proche de la zone d'intérêt IX riche en Mo déterminée par le levé pédogéochimique. Six sondages ont été réalisés dans cette zone mais très peu d'analyses ont été effectuées. Cependant, certaines intersections ont montré de bonnes valeurs en argent. Les journaux de sondage indiquent des sections de roches majoritairement sédimentaires avec la présence de nombreuses failles ainsi que de dykes (Fig. 6.15).

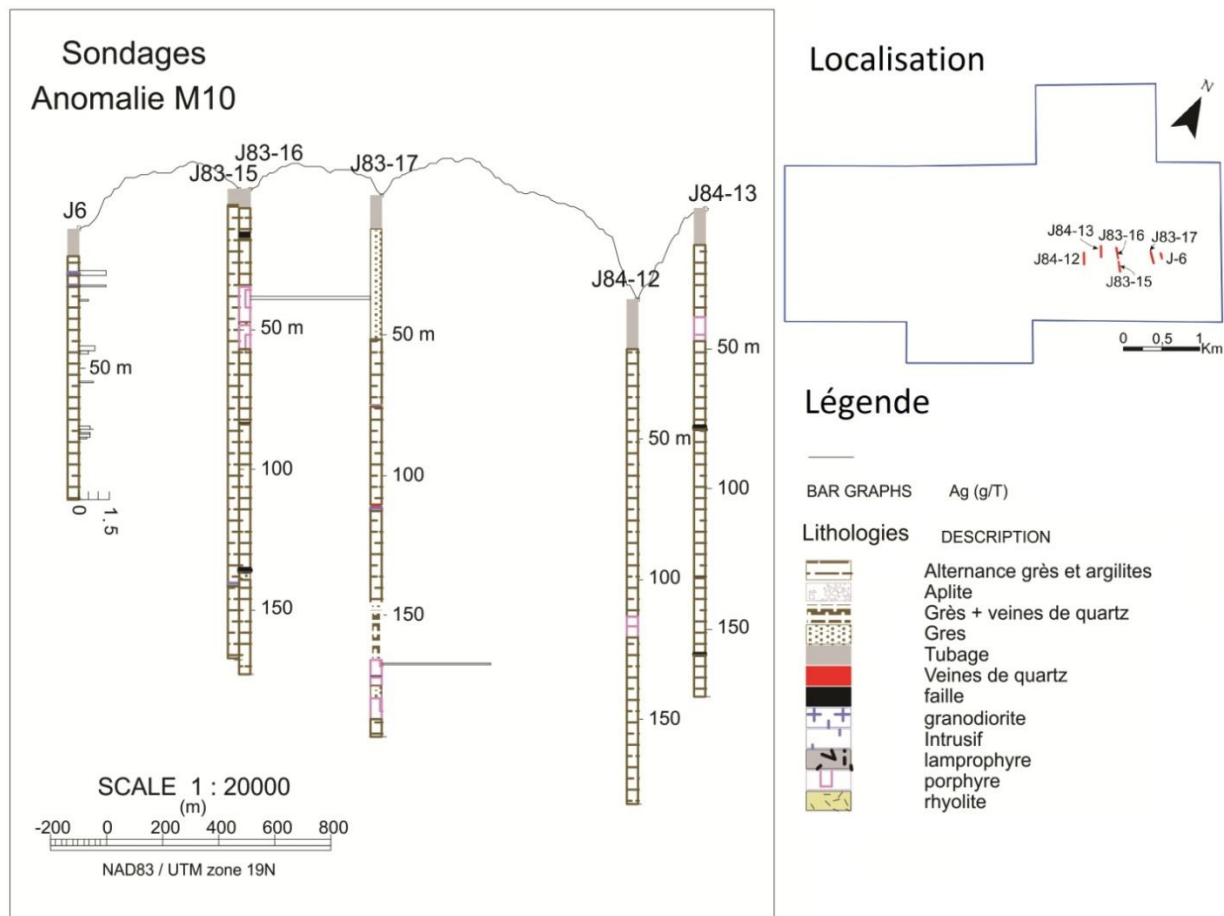


Figure 6.15 : Section présentant les lithologies et concentrations en argent des différents forages effectués dans la zone anomalique M10. La concentration maximale en argent est de 6,1 g/t. Les orientations et pendages des forages ne sont pas représentés.

6.1.3 Levé électromagnétique TBF (VLF)

6.1.3.1 Principe

On appelle très basse fréquence (TBF ou VLF) la bande de radiofréquences qui s'étend de 3 à 30 kHz (longueur d'onde de 100 à 10 km). Les ondes VLF pénètrent dans l'eau jusqu'à une profondeur de 10 à 50 mètres. Elles sont utilisées pour les télécommunications avec les sous-marins proches de la surface, pour la radionavigation et enfin pour la recherche géophysique. Les principaux émetteurs de haute puissance utilisés pour des levés géophysiques en Amérique du Nord sont Bangor, Maine, Seattle, Washington, Annapolis, Maryland et Lualualei (Hawaii) (Fig. 6.16).



Figure 6.16 : À gauche : photographie montrant un émetteur VLF militaire (Grimeton, Suède), tirée de http://fr.wikipedia.org/wiki/Station_radio_de_Grimeton (consulté le 25 août 2012). À droite : photographie montrant un sous-marin Trident utilisant le signal VLF, tirée de http://www.theregister.co.uk/2007/02/26/windows_boxes_at_sea/page2.html (consulté le 25 août 2012).

Le champ émis par la station VLF consiste en un champ électrique vertical et un champ magnétique horizontal (Fig. 6.17). Ces champs sont perpendiculaires à la direction de propagation du signal VLF. La puissance du champ émis par la station VLF est si élevée qu'il induit des courants électriques dans des corps conducteurs situés à des centaines et milliers de kilomètres de l'émetteur. Ces courants induits produisent des champs magnétiques secondaires qui peuvent être détectés à la surface suite à une perturbation du champ primaire. La phase du champ secondaire peut être déphasée et orientée dans une direction différente que le champ primaire en fonction de la géométrie du conducteur et des contrastes de conductivité.

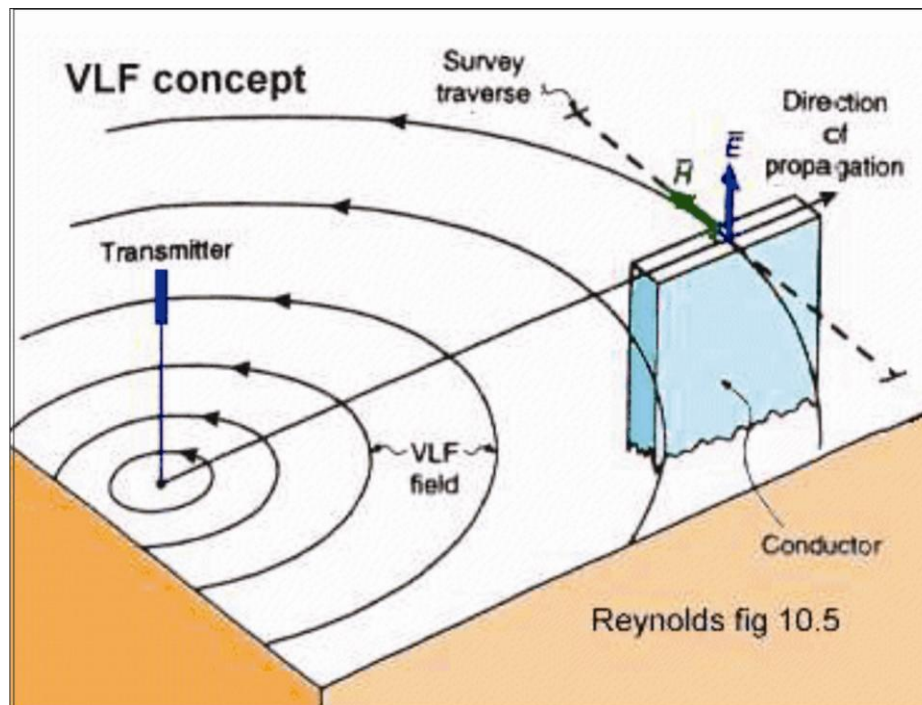


Figure 6.17 : Plan schématique montrant la propagation d'une onde VLF à la surface du globe. Idéalement le conducteur recherché doit être dans un alignement avec la station émettrice du signal. Modifiée de <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/index.htm>. (Consulté le 25 août 2012).

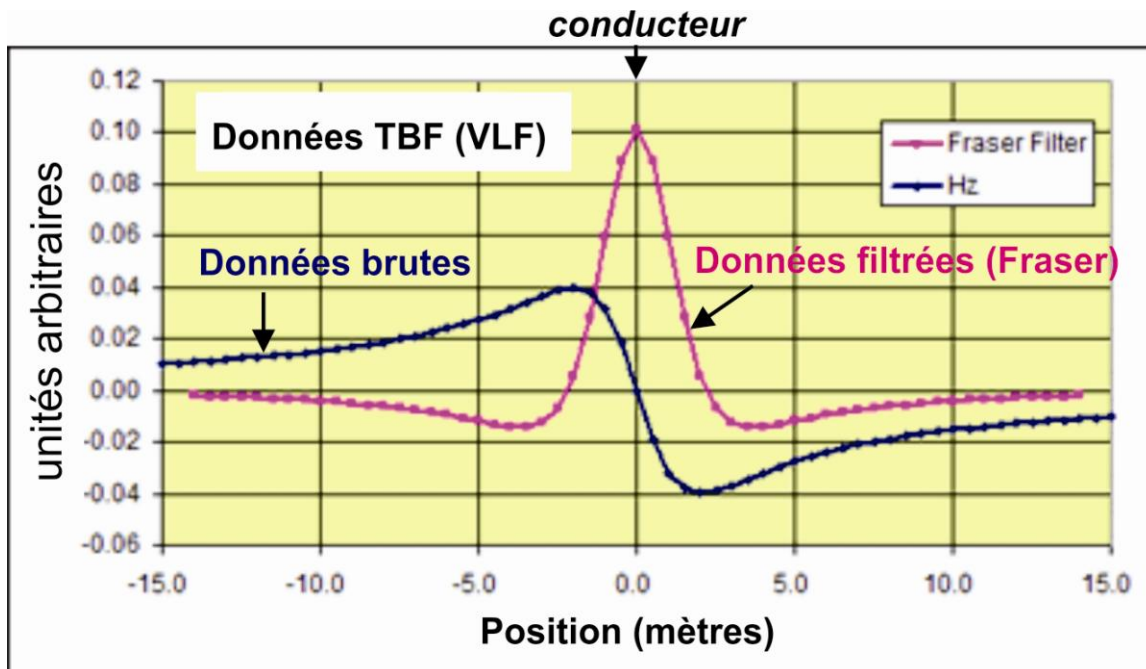


Figure 6.18 : Exemple de données VLF filtrées par la méthode Fraser. Modifiée de <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/index.htm>. (Consulté le 25 août 2012).

Le récepteur VLF mesure simultanément les champs primaire et secondaire. Les données enregistrées par le receveur VLF sont le *tilt angle* et l'ellipticité du champ. Un filtre Fraser est ensuite appliqué aux données afin de calculer le gradient horizontal et de lisser les données en englobant quatre mesures consécutives. La figure précédente montre un exemple de données VLF filtrées par la méthode Fraser (Fig. 6.18). Notez que le filtre Fraser replace l'intensité maximale du signal sur la position du conducteur.

Pour les applications géophysiques, le signal EM-TBF se propage bien dans les fractures saturées d'eau et dans les zones de sulfures ou de graphite et même dans les unités d'argiles non consolidées. Contrairement aux autres méthodes électromagnétiques (ex. FDEM ou TDEM), la méthode EM-TBF est sensible à l'orientation des émetteurs (Tx) par rapport à la direction des cibles recherchées. Idéalement il faut choisir une antenne (Tx) émettrice alignée avec les conducteurs recherchés sur le terrain.

La profondeur d'investigation d'un levé EM-TBF est limitée à 60 - 70 % de la profondeur pelliculaire (*skin depth*) des sols et roches environnantes. Compte tenu des fréquences relativement élevées utilisées lors de levé EM-TBF, la pénétration verticale sera modeste dans des environnements conducteurs (ex. matériaux argileux ou saturés en eau). Par exemple dans des matériaux de 25 Ohm m, la profondeur d'investigation sera de 10 à 12 mètres. Pour des terrains très résistifs, la pénétration sera de l'ordre de 40 à 60 mètres et de seulement 4 ou 5 mètres pour des terrains très conducteurs (ex. argiles marines). Les levés EM-TBF sont généralement plus efficaces en terrain résistif avec peu de mort-terrain.

Notez qu'il existe plusieurs types de conducteurs : une structure géologique particulière telle qu'une faille, des zones de cisaillement, un mort-terrain conducteur, une surface humide ou une zone de minéralisation en sulfures. Les minéraux métalliques conducteurs les plus souvent détectés à l'aide de cette méthode sont la pyrite, la pyrrhotite, la galène et la chalcopryrite. Malheureusement, le graphite est également très conducteur et répond également aux systèmes électromagnétiques. Normalement, cette méthode est surtout utilisée dans les régions où le mort-terrain est peu épais et non conducteur.

Dans le cadre de ce mémoire, nous présentons les données du levé électromagnétique VLF-TBF réalisé pour les Mines JAG. Quoique d'une profondeur d'investigation parfois modeste, ces données peuvent être utiles pour identifier la présence de conducteurs électriques.

Par exemple, les amas de sulfures massifs (ex. skarns) et semi-massifs, les unités graphiteuses et les shales sont des corps géologiques susceptibles d'être détectés en l'absence d'une grande épaisseur de dépôts glaciaires et d'alluvions. Notez que la méthode VLF-TBF peut être fortement influencée par des discontinuités abruptes dans l'épaisseur du mort-terrain. L'interprétation de ces données doit être réalisée de concert avec les données sur l'épaisseur de mort-terrain.

Le levé EM-TBF sur la propriété St-Robert a été effectué sur la même grille de mesure que le levé magnétométrique (Fig. 6.6).

6.1.3.2 Résultats et interprétations

Les minéralisations au sein de la propriété St-Robert se présentent très souvent sous des formes disséminées. Malheureusement, ce type de levé repère très mal ce style de minéralisation et il peut donc être difficile, voire impossible de déterminer une quelconque minéralisation de sulfures disséminés à partir du levé EM-TBF effectué. C'est la raison pour laquelle Sagax Géophysique (1984) et Koita (2011) n'ont porté que très peu d'intérêts à ces résultats.

Malgré ces observations, les données VLF peuvent être utiles pour améliorer l'interprétation géologique de la propriété. Les résultats du levé sont représentés en figure 6.19.

Nous pouvons tout d'abord constater que les valeurs Fraser sont distribuées de façon anisotrope sur la propriété et qu'elles semblent suivre une structure particulière parallèle au grain tectonique régionale des Appalaches (NE-SO). Étant donné la présence de schistes et de schistes graphiteux (électriquement conducteur) dans la Formation de Frontenac, nous pouvons en déduire que la majorité des anomalies TBF représente en réalité la présence de lits de schistes et de schistes graphiteux sous-jacents. Ceci nous renseigne donc sur l'orientation des strates de la Formation de Frontenac sur la propriété St-Robert.

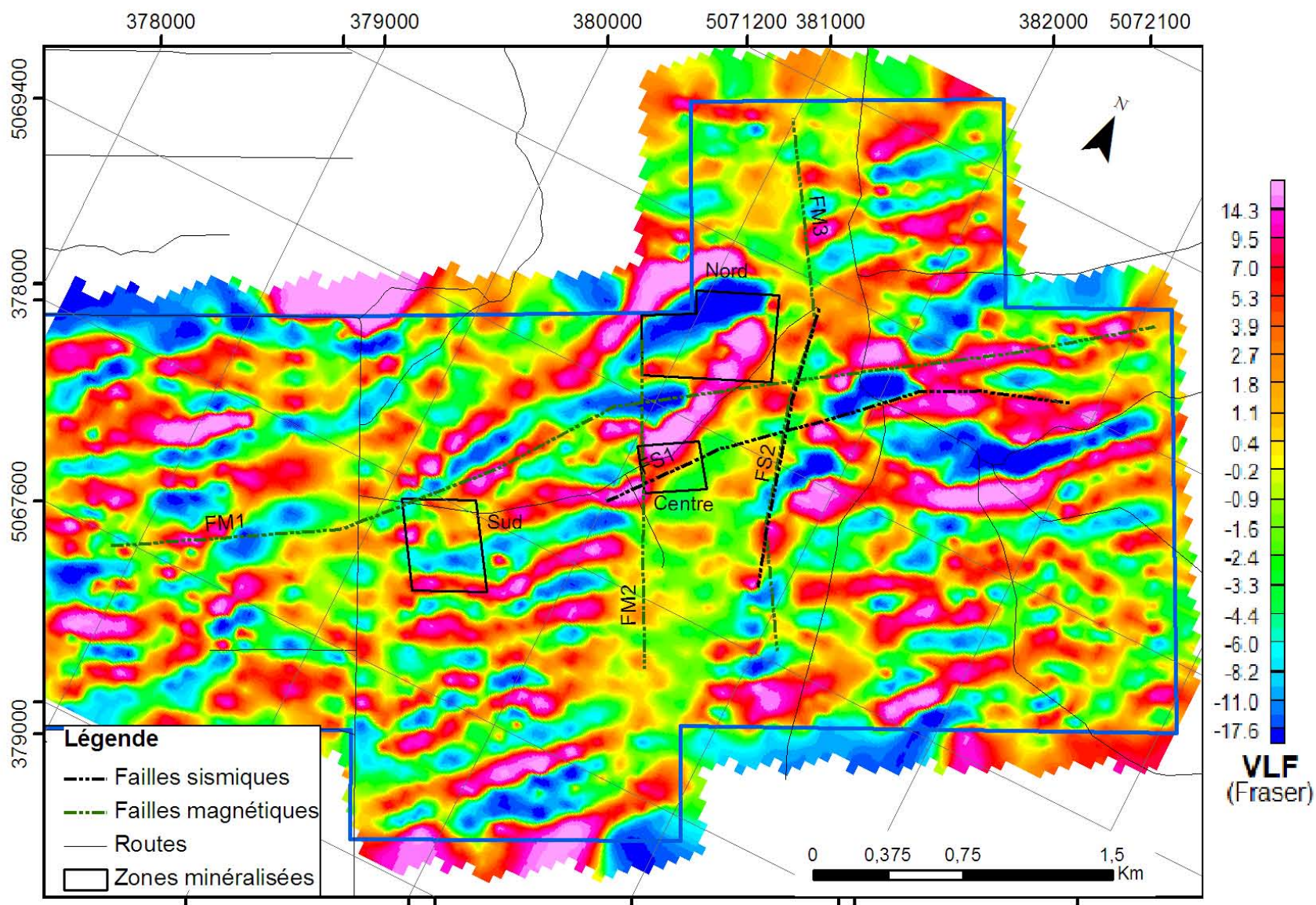


Figure 6.19 : Carte montrant la variabilité du champ électromagnétique sur la propriété St-Robert.

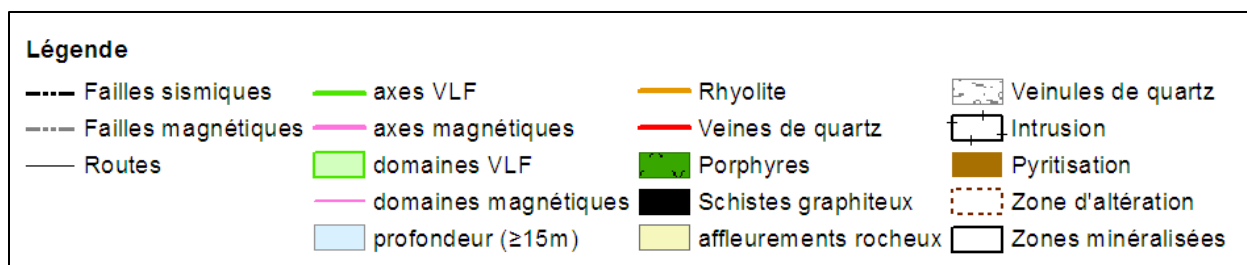


Figure 6.20 : Carte de compilation des anomalies EM-TBF, magnétiques et de la géologie de la propriété. Les chiffres romains indiquent les zones d'intérêts pédogéochimiques. Se référer au chapitre correspondant pour plus de détails.

Suivant le même plan que l'étude du levé magnétique, nous avons tracé les axes des anomalies EM-TBF pour les présenter à la figure 6.20 avec les anomalies magnétiques et la géologie de la propriété. Notez qu'un résumé de ces anomalies est présenté dans le tableau 6.4.

Tout d'abord, compte tenu de la forte épaisseur de mort-terrain (supérieure à 15 mètres), les **anomalies TBF V3, V10, V11, V31, V33, V41, V50 et V51** doivent être traitées avec rigueur, car la source anormale pourrait être le mort-terrain conducteur lui-même. De même, dans les secteurs où aucune caractérisation du mort-terrain n'a été effectuée, il faut rester très vigilant quant à l'interprétation des anomalies.

Les **anomalies électromagnétiques EM-TBF V37 et V38** se superposent quasiment aux domaines anormaux magnétiques M4 et M7 et à la zone d'intérêt pédogéochimique I (Bi-Ag). Ce secteur de la propriété a été très peu étudié et sur le terrain, le mort-terrain est relativement épais et seuls des blocs erratiques sont visibles. La superposition de ces trois domaines anormaux (électromagnétique, magnétique et pédogéochimique) est significative ce qui implique une étude plus en détail de cette zone. Notez que le forage J13 situé proche de l'anomalie V37 contenait des veines de quartz minéralisées en galène, scheelite et possiblement molybdénite (Fig. 6.13). De plus, une importante anomalie en or a été détectée dans les sédiments de ruisseaux analysés par le MRNF dans la prolongation vers le sud-ouest de l'anomalie V37.

Il semble que certaines zones d'intérêts pédogéochimiques enrichies en bismuth, argent ou molybdène soient également conductrices. C'est en effet le cas pour les anomalies EM-TBF précédentes, ainsi que les anomalies **V41, V26 et V32** qui sont situées sur les zones d'intérêts X (Bi-Ag), II (Bi) et IX (Mo) respectivement.

Ces quatre zones d'intérêts devraient faire l'objet d'études plus poussées. Notez toutefois que l'anomalie V41 est située sur une zone où le mort-terrain a une épaisseur variant entre 15 et 30 mètres.

Les **anomalies EM-TBF V29 et V47** passent toutes les deux près d'affleurements riches en pyrite et la source provient probablement de la présence de schistes et possiblement de la pyrite si cette dernière est localement suffisamment concentrée pour permettre la transmission du courant électrique. De plus, les **anomalies EM-TBF V6 et V24** se situent très près d'unités de schistes graphiteux que nous avons observées sur le terrain. Jusqu'à preuve du contraire, les anomalies V29, V47, V6 et V24 peuvent donc être négligées.

De même, l'**anomalie EM-TBF V4** est située au niveau du chemin de la mine. Une ligne électrique est probablement à l'origine de l'anomalie.

Les **anomalies EM-TBF V8 et V48** se superposent avec le domaine magnétique M10 (Fig. 6.15). Ce domaine, proche de l'intrusion St-Robert et des failles FS2 et FM3, est intéressant du fait que les forages ont recelé la présence de nombreuses failles qui pourraient être porteuses de minéralisations. De plus, le fait que ces deux domaines anomaliques se chevauchent rend cette zone encore plus intéressante et mérite une exploration plus approfondie.

L'**anomalie EM-TBF V45** au nord de la propriété est située proche du sondage J14 (Fig. 6.21). Ce forage contient quelques veines de quartz très peu minéralisées en pyrite. Quelques analyses ont été effectuées mais seulement pour l'or et ne décelant pas de valeurs particulièrement importantes. De plus, cette anomalie est située entre deux chemins d'érablière pouvant avoir affecté le levé EM-TBF.

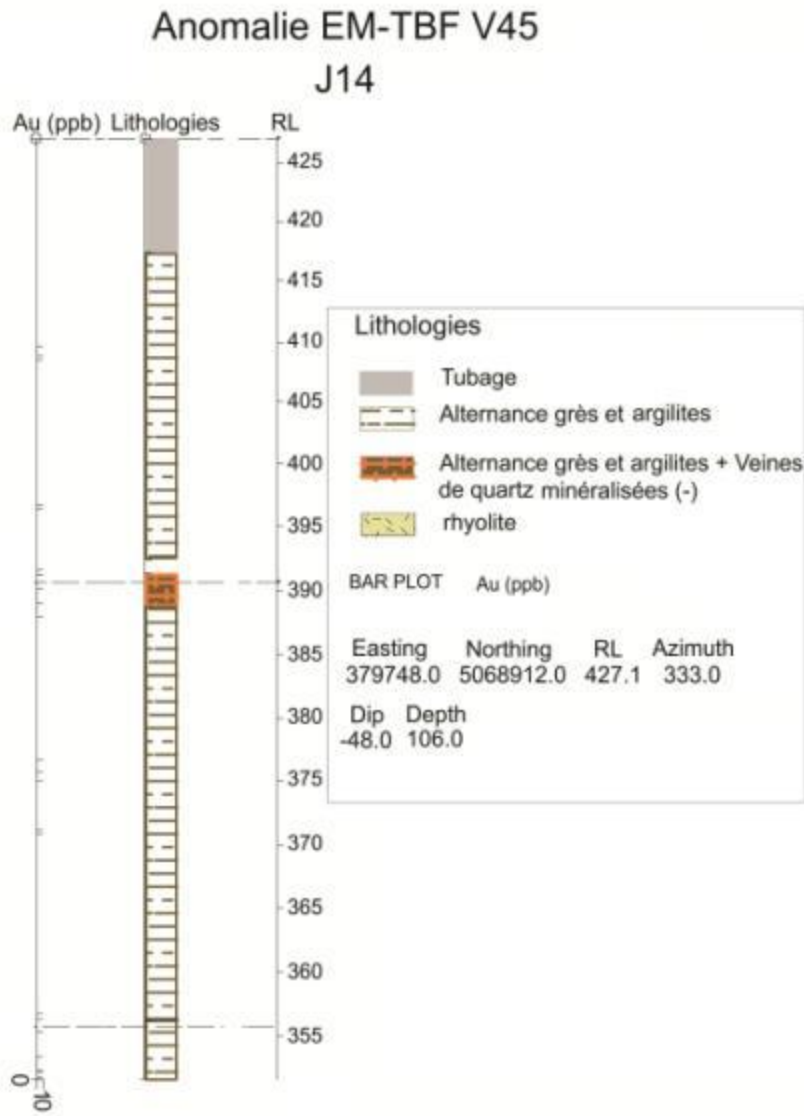


Figure 6.21 : Représentation du relevé de forage J14.

De même, l'**anomalie EM-TBF V5** se superpose avec le domaine magnétique M3 traversant la zone minéralisée Sud. Cette zone s'étend sur plus de 1,5 kilomètre et contient de nombreux dykes quartzo-feldspathiques et veines de quartz minéralisées ou non. Il est possible que ces dernières soient à l'origine de ces anomalies. Les forages ont également montré quelques unités de schistes graphiteux pouvant être à l'origine de cette anomalie (Fig. 6.22). Comme cette anomalie passe au niveau de la zone minéralisée Sud, il serait intéressant d'étudier la totalité de la zone anomalique dans le but de découvrir un prolongement éventuel de la zone Sud.

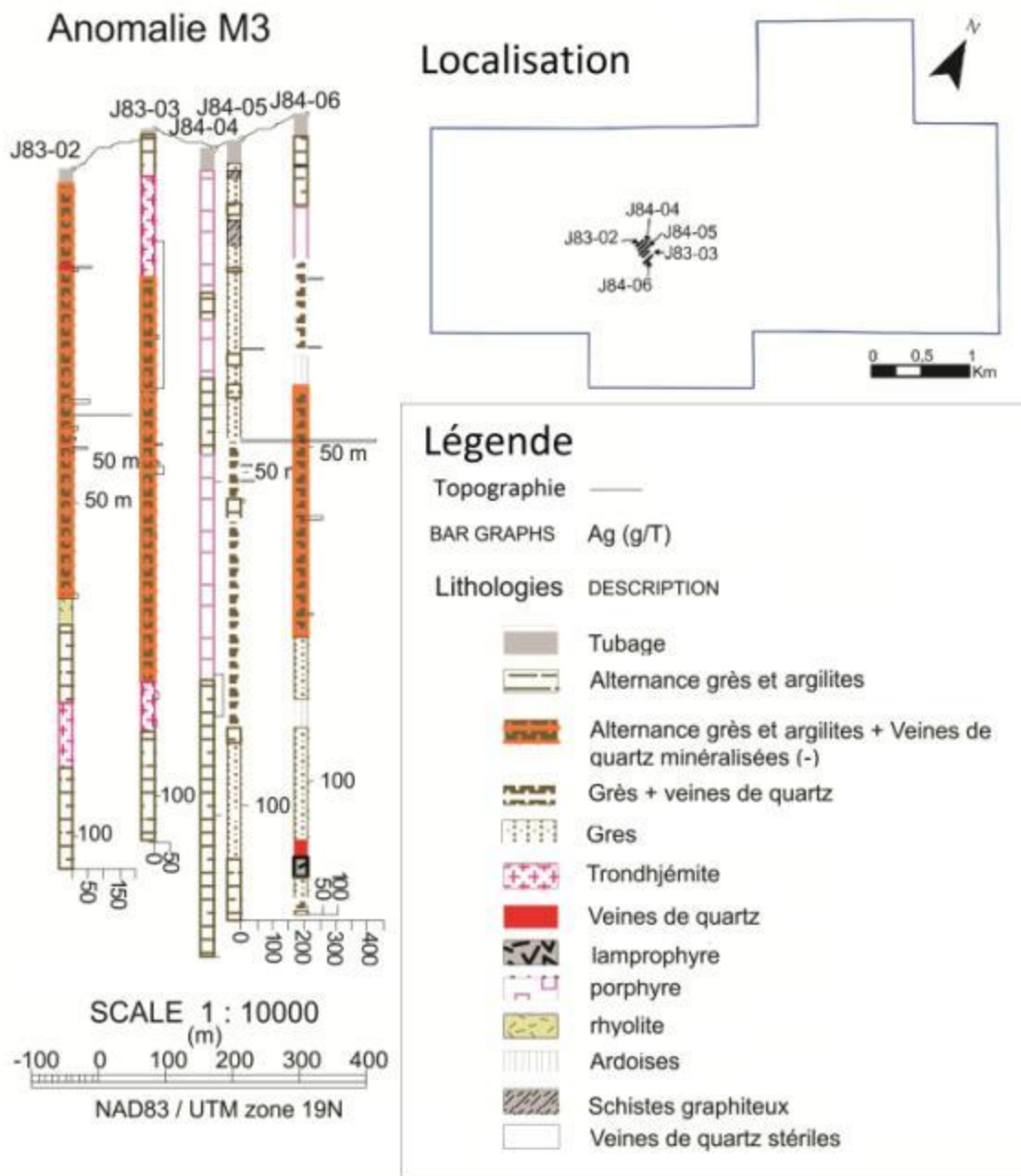


Figure 6.22 : Section des forages de l'anomalie M3 située dans la zone Sud.

Au niveau structural, plusieurs observations sont intéressantes :

- Les anomalies **EM-TBF V51, V41 et V32** se situent en bordure de l'intrusif St-Robert. De plus, les anomalies V51 et V41 sont toutes les deux superposées et parallèles à la faille FS1. Cette observation pourrait suggérer la présence de minéralisations importantes qui se seraient mises en place au niveau de la faille. Toutefois, notez que les anomalies V51 et V41 se situent toutes les deux au niveau de mort-terrain dont l'épaisseur varie entre 15 et 30 mètres.
- **L'anomalie EM-TBF V31**, située au nord-est, se superpose à la faille FM1 et aucun forage n'a été effectué proche de cette zone. Il serait donc intéressant de l'étudier plus en détail.
- **L'anomalie EM-TBF V50** est située dans la zone des deux failles FS2 et FM3 et présente une orientation distincte de la plupart des autres anomalies, indiquant possiblement un contrôle structural. Cette dernière observation peut être un argument intéressant et peut également suggérer la présence de minéralisation.
- **L'anomalie EM-TBF V26** est superposée à la faille FM1. De plus, comme nous l'avons décrit précédemment, cette anomalie est située au niveau de la zone d'intérêt pédogéochimique II.

6.1.4 Levés de résistivité électrique et de polarisation provoquée

6.1.4.1 Principe

Un levé de polarisation provoquée permet de déterminer deux caractéristiques importantes: la chargeabilité et la résistivité électrique apparente (REA). De ces deux paramètres découle l'indice *Facteur Métal* :

$$\text{Facteur Métal} = 1000 \times \frac{\text{Chargeabilité}}{\text{Résistivité}}$$

Dans un contexte de roches (ex. shales, shales graphiteux) et de recouvrements de dépôts glaciaires localement conducteurs, la combinaison des données de polarisation provoquée et de résistivité électrique permet de mieux localiser les zones minéralisées. Ceci ne peut être réalisé à partir de simples données de levés de type EM-TBF.

La résistivité électrique est une méthode classique d'exploration pour détecter les corps minéralisés électriquement conducteurs (sulfures massifs, graphite, etc., ...). Dans l'environnement géologique, les valeurs de résistivité électrique sont influencées par la porosité, l'humidité (% eau), la quantité d'électrolytes dissous, la température des fluides et la conductivité électrique des minéraux.

Dans les terrains appalachiens, les données de résistivité électrique apparente sont surtout utilisées pour documenter la variabilité d'épaisseur du mort-terrain et localement pour identifier la présence de différentes unités géoélectriques (ex. grès vs shales). La figure 6.23 montre l'étalement des valeurs de résistivité électrique normalement observé dans un contexte géologique comme celui de St-Robert. Premièrement, le substrat glaciaire constitué de tills variablement saturés en eau devrait être électriquement plus conducteur (faibles valeurs de résistivité électrique) que les roches sédimentaires détritiques (ex. grès et conglomérats) (Fig. 6.23). Les dykes porphyriques et l'intrusion de St-Robert devraient montrer de très hautes valeurs de résistivité électrique (> 1000 Ohm m). Notez cependant que l'intrusion de St-Robert est relativement profonde (probablement plus de 150 mètres) et que les dykes porphyriques sont généralement trop minces (souvent submétriques) pour significativement influencer les valeurs de résistivité électrique apparente mesurées sur le terrain avec des dispositifs impliquant l'utilisation d'électrodes espacées de plus de 30 mètres.

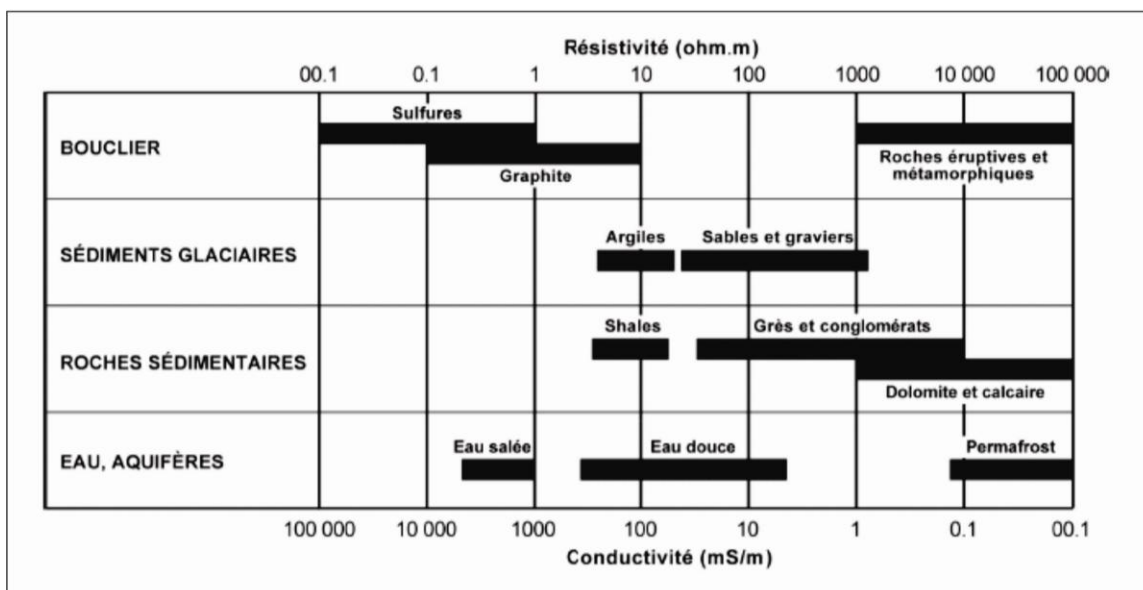


Figure 6.23 : Étalement des valeurs de résistivité électrique et de conductivité électrique de différents types de roches, de sédiments glaciaires et d'eaux souterraines. Modifiée de <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/index.htm> (consulté le 06/09/2012).

La nature disséminée des minéralisations de surface observées sur le site de St-Robert ne permet pas l'utilisation des valeurs de résistivité électrique pour définir la localisation et la géométrie des zones minéralisées. Toutefois, ces zones minéralisées contiennent une forte proportion de sulfures électriquement polarisables (pyrite, galène, etc., ...), ce qui permet des mesures de chargeabilité électrique par la méthode de polarisation provoquée.

La chargeabilité permet d'évaluer la capacité du sol et des roches à emmagasiner puis à restituer un courant électrique. Elle correspond à la mesure de la relaxation électrique des sols et du roc après injection d'un courant électrique dont les propriétés sont connues (voltage, ampérage). Les corps géologiques polarisables, en fonction de la minéralogie et de la chimie des fluides, se comportent comme des condensateurs électriques en emmagasinant du courant électrique puis en le restituant au bout d'un certain laps de temps. C'est ce temps qui est mesuré pour la détermination des mesures de chargeabilité.

À l'aide d'un dipôle d'injection, on injecte un courant dans le sol et/ou les roches qui va créer des anomalies de chargeabilité suite à la polarisation des minéraux conducteurs polarisables avec lequel il sera en contact. Ces éléments conducteurs peuvent être les minéraux à lustre métallique tels que la plupart des sulfures, la magnétite et le graphite, ou bien les membranes de minéraux argileux.

La mesure de chargeabilité permet donc de cartographier des minéralisations de sulfures disséminées. Elle est suffisamment sensible pour détecter des minéralisations non visibles par les méthodes électromagnétiques. La polarisation provoquée a été abondamment utilisée pour détecter des gisements de cuivre porphyrique, des sulfures aurifères, des dépôts de manganèse et des placers titanifères.

La figure 6.24 montre l'effet de chargeabilité lors d'un levé de polarisation provoquée. Sur cette figure les voltages injectés par l'émetteur (Tx) et ceux enregistrés par le récepteur (Rx) sont présentés en fonction du temps (en msec). L'enregistrement du récepteur montre une courbe décroissante et ce malgré l'arrêt complet d'injection de courant par l'émetteur. Ceci montre l'effet de chargeabilité associé à la présence de particules minérales polarisables.

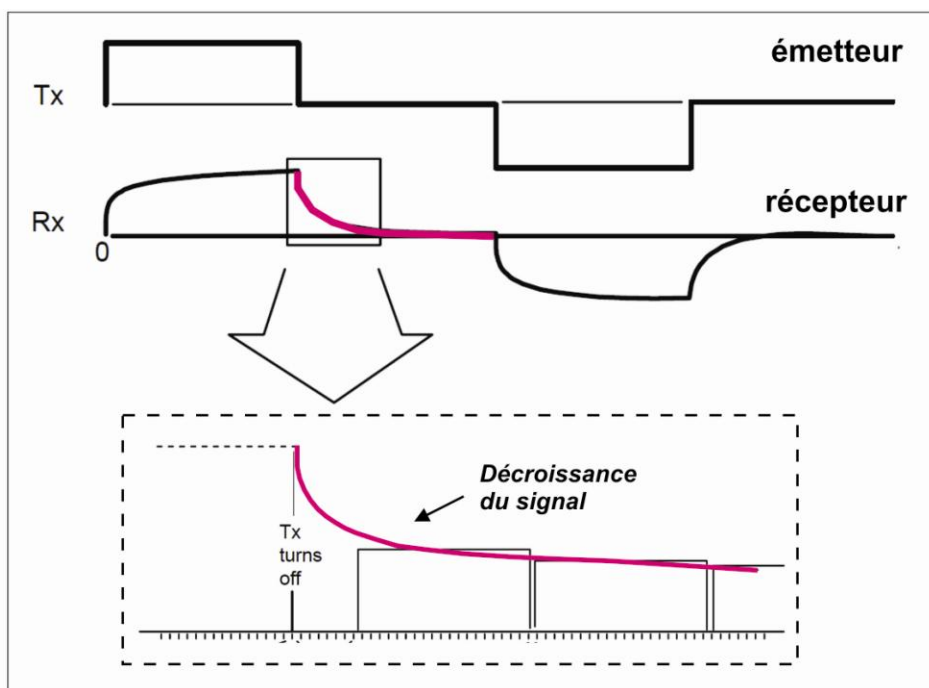


Figure 6.24 : Courbes de voltage en fonction du temps lors de l'injection de courants électriques. L'injection de courant (émetteur) est discontinuée et dans les périodes sans injection le récepteur mesure la décroissance du voltage résultant de la présence de phases électriquement polarisables. Inspirée de http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/methods/meth_2/index.htm (consultée le 5 août 2012).

Le tableau 6.2 montre les valeurs de chargeabilité normalement observées dans des roches contenant 1 % d'une phase minérale électriquement polarisable. Notez les hautes valeurs pour la pyrite qui est une phase fréquemment observée sur le site de St-Robert ainsi que la plus faible chargeabilité de la galène qui est également présente à St-Robert.

Le tableau 6.2 montre également l'étalement des valeurs de chargeabilité observé dans les principaux types de roches, les graviers, les alluvions et dans les eaux souterraines.

En l'absence de grande quantité de pyrite, les valeurs de chargeabilité électrique devraient varier de 3 à 12 millisecondes dans les roches sédimentaires de St-Robert et les données devraient légèrement diminuer dans les secteurs à fortes épaisseurs de dépôts quaternaires.

Tableau 6.2 : Valeurs de chargeabilité observées pour des minéraux (1 % en volume de la roche) et pour différents milieux, pour un temps d'investigation de 0,02 à 1 seconde. Valeurs issues de http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/methods/meth_2/index.htm (consulté le 06/09/2012).

Chargeabilité de différents minéraux (milliseconde)		Chargeabilité de différents matériaux géologiques (milliseconde)	
Pyrite	13,4	Eau souterraine	0
Chalcocite	13,2	Alluvions	1 à 4
Cuivre	12,3	Graviers	3 à 9
Graphite	11,2	Volcanites PC	8 à 20
Chalcopyrite	9,4	Gneiss	6 à 30
Bornite	6,3	Schistes	5 à 20
Galène	3,7	Grès	3 à 12
Magnétite	2,2	Argilites	3 à 10
Malachite	0,2	Quartzites	5 à 12
Hématite	0		

Les mesures de polarisation provoquée peuvent être réalisées soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel en utilisant différentes configurations d'électrodes de transmission et de réception (ex. dispositifs Wenner, Schlumberger, gradient, dipôle-dipôle, etc., ...). Dans le cas présent, les mesures ont été réalisées dans le domaine temporel avec une configuration de type dipôle-dipôle. Certains levés sont parfois réalisés dans le domaine fréquentiel ce qui permet la mesure de données de résistivité électrique complexe ou spectrale. Ces méthodes permettent souvent de discriminer la nature des phases polarisables et aussi d'estimer d'autres paramètres utiles comme le signal rémanent électromagnétique (REM). Compte tenu des effets de couplage EM lors de levés de polarisation provoquée, l'obtention de données REM est utile pour détecter des cibles très profondes.

Des quatre levés de polarisation provoquée réalisés sur la propriété St-Robert, nous présenterons les résultats des levés d'Edwin Gaucher & Associées (1981) et ceux de Phoenix Géophysics inc. (1983).

6.1.4.2 Levé de polarisation provoquée de Edwin Gaucher & Associées (1981)

Ce levé a été effectué sur une grille de mesure différente de celle des levés magnétométrique et électromagnétique TBF (Fig. 6.25). Le périmètre du levé devait permettre de documenter la présence de minéralisations disséminées dans les secteurs des zones minéralisées Centre et Nord.

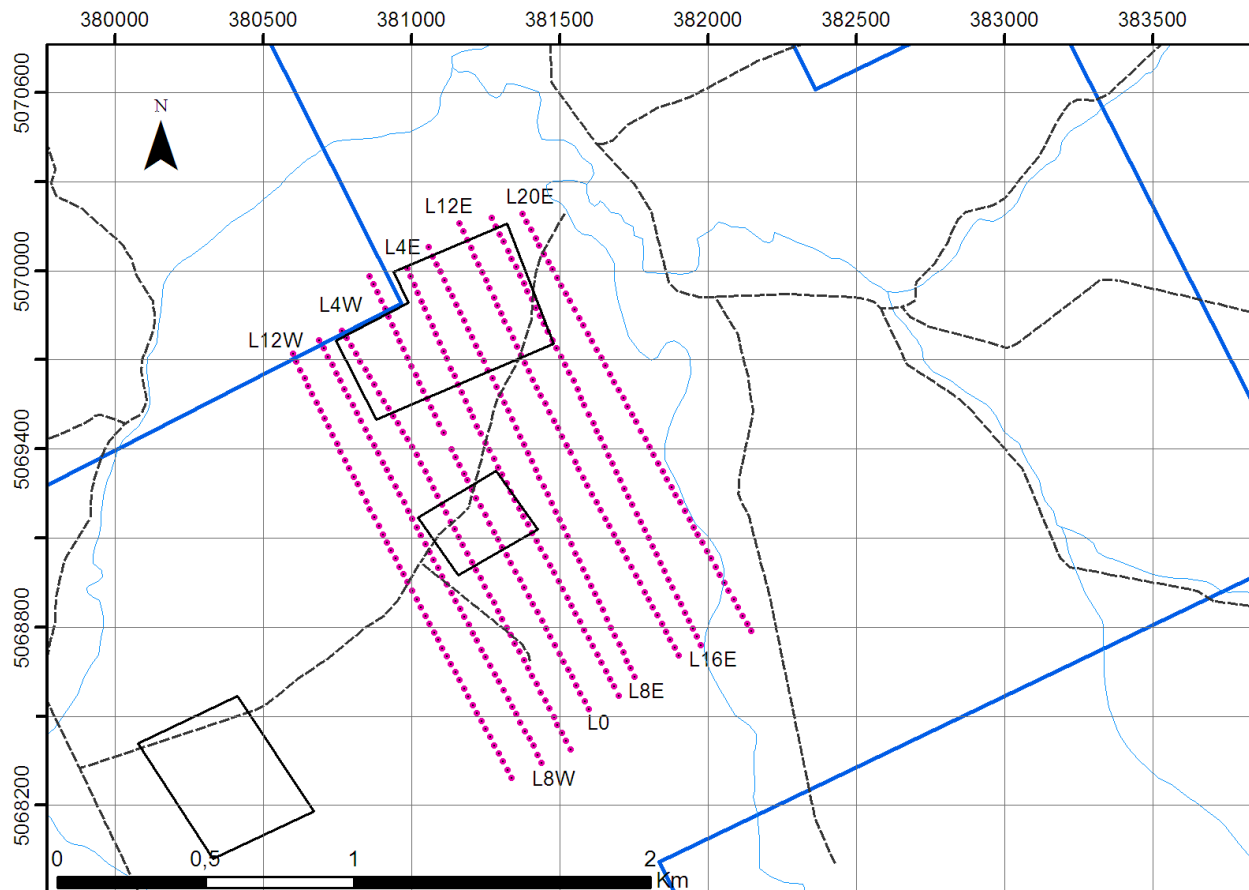


Figure 6.25 : Grille de mesure du levé de polarisation provoquée effectué par Edwin Gaucher & Associées (1981).

Les mesures ont été effectuées selon la configuration dipôle-dipôle avec une distance de séparation des électrodes de 30 mètres et pour une seule valeur de séparation ($n=1$). Cette configuration ne permet pas l'obtention d'imagerie géoélectrique et la pénétration verticale du levé est modeste. Le levé a été effectué à l'aide d'un récepteur SWP-1 d'Instrumentation GDD et d'un émetteur Crone de 250 watts. La fenêtre d'intégration des données de polarisation provoquée était de 0,5 à 1,5 seconde.

(a) Résultats et interprétations

La figure suivante permet de visualiser la dispersion des données de résistivité électrique apparente (REA), de chargeabilité et de l'indice du Facteur Métal pour le levé de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés. Dans l'ensemble, les données de REA varient de plusieurs ordres de magnitudes (Fig. 6.26a). Les données de chargeabilité varient de 0 à 32 millisecondes et ces dernières ont tendance à être plus élevées dans les zones plus résistives de la propriété. À l'opposé, les données de l'indice du Facteur Métal sont anticorrélées à celles de la REA (Fig. 6.26b), ce qui démontre l'influence des zones plus conductrices sur le calcul de l'indice. Cette observation doit impérativement être tenue en compte lors de l'interprétation des données de l'indice du Facteur Métal (identification de zones minéralisées). La figure 6.26c montre deux tendances dans les corrélations entre l'indice du Facteur Métal et la chargeabilité. Le premier montre une faible variabilité de l'indice du Facteur Métal en fonction de l'augmentation de la chargeabilité et le second une corrélation positive entre les deux paramètres. Ces corrélations démontrent de la complexité de l'interprétation des données de Facteur Métal dans un contexte de forts contrastes de valeurs de REA et d'une épaisseur variable de dépôts quaternaires.

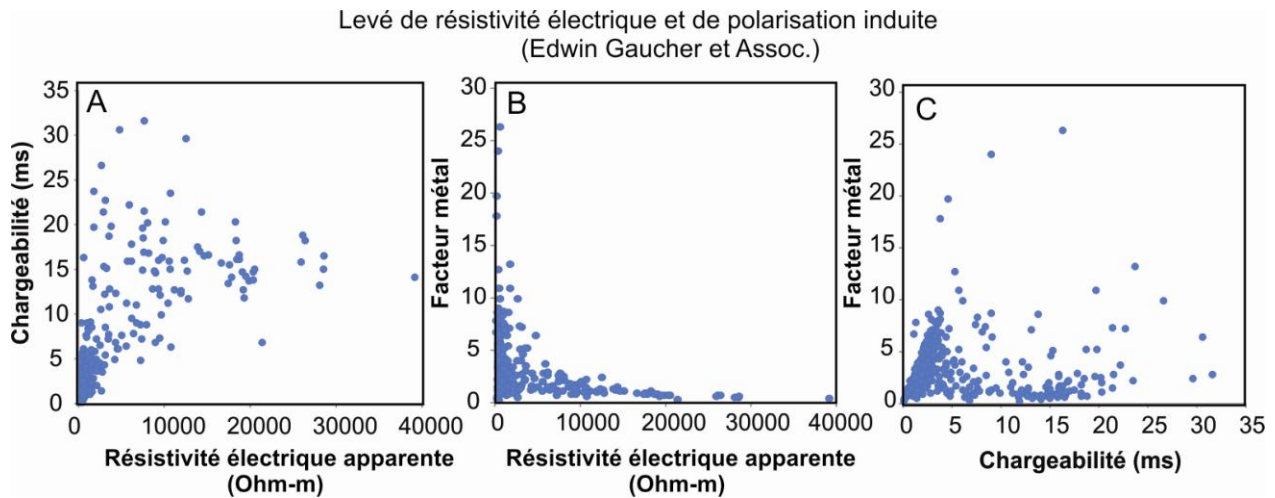


Figure 6.26 : Variabilité des données de résistivité électrique apparente, de chargeabilité et de l'indice *Facteur Métal* pour le levé de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés.

Les valeurs de résistivité électrique apparente, présentées à la figure 6.27, indiquent la présence de domaines de hautes valeurs de REA à l'ouest et de valeurs plus modérées vers le centre de la carte. Cette distribution ne suit donc pas le grain tectonique appalachien qui est orienté NE-SO dans cette région de la Beauce.

Comme souligné dans la section des données de réfraction sismique, cette variabilité spatiale doit, en très grande partie, être contrôlée par un effet de mort-terrain électriquement plus conducteur que les roches sédimentaires et intrusives constituant le substrat rocheux local.

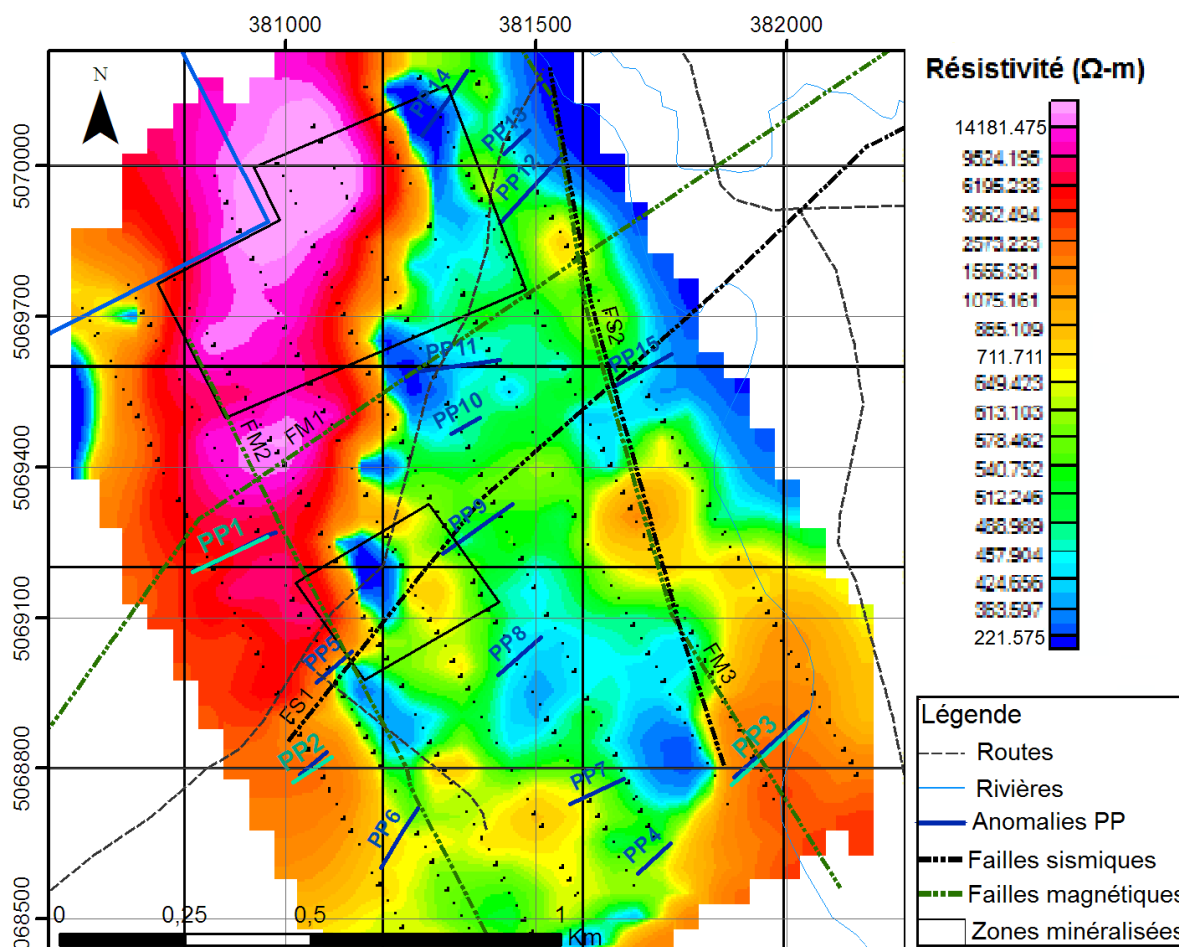


Figure 6.27 : Carte présentant la variabilité spatiale des données de résistivité électrique apparente interpolées par krigeage. Sur cette carte, la position des anomalies de chargeabilité (PP) est indiquée.

Globalement, les distributions des valeurs de chargeabilité (Fig. 6.28) et de l'indice *Facteur Métal* (Fig. 6.29) sont également anisotropes. Nous pouvons constater des similitudes comme la présence de domaines géométriquement semblables sur les cartes des valeurs de résistivité électrique apparente et de chargeabilité. A priori, ceci pourrait suggérer la présence d'un mécanisme commun expliquant les variabilités observées sur les cartes. À l'opposé, une corrélation généralement négative et aussi plus complexe est observée entre les valeurs de l'indice *Facteur Métal* et celles de la résistivité électrique apparente et de la chargeabilité. En effet, dans l'ensemble, les hautes valeurs de résistivité correspondent aux domaines de hautes valeurs de chargeabilité et inversement pour l'indice *Facteur Métal*.

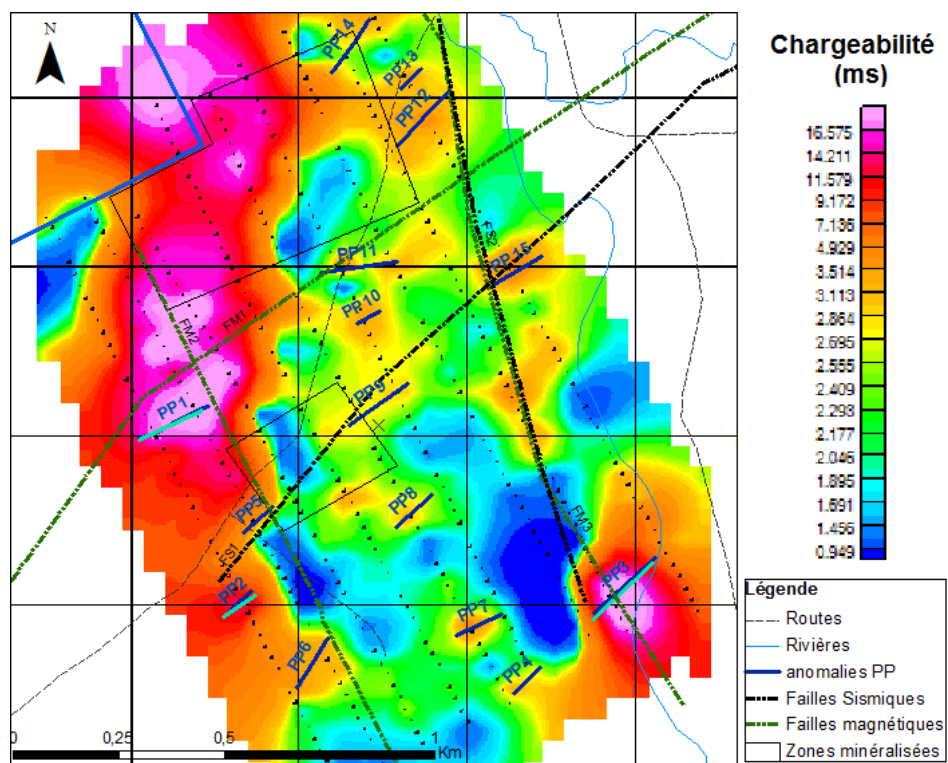


Figure 6.28 : Carte représentant les variations des valeurs de chargeabilité.

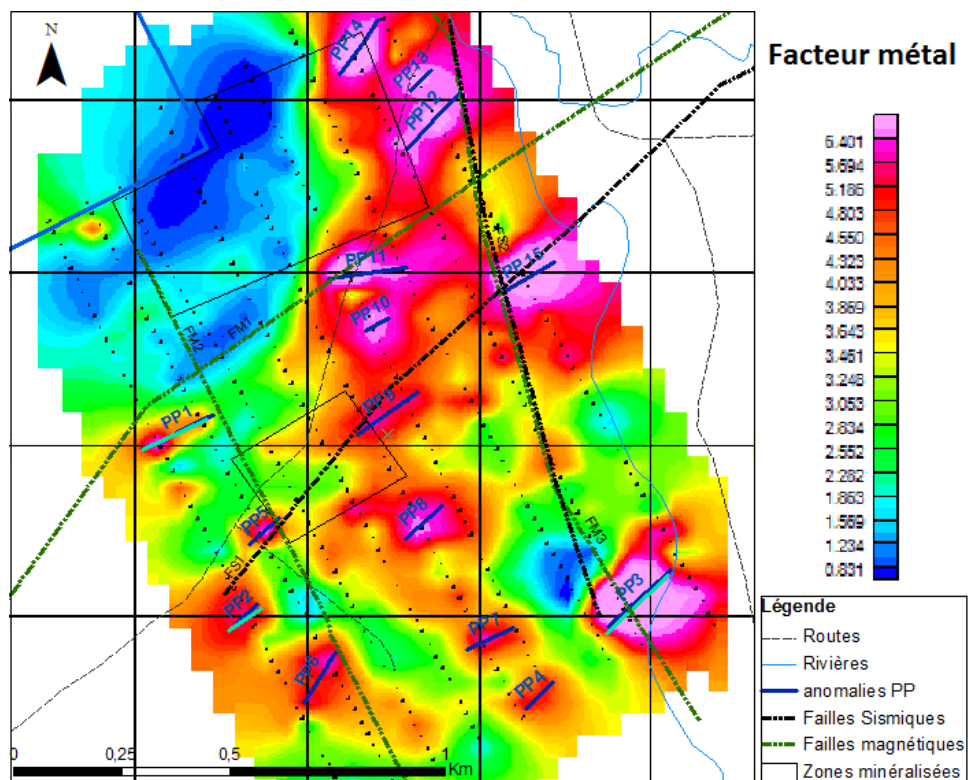


Figure 6.29 : Carte représentant les variations des valeurs de l'indice *Facteur Métal*.

Compte tenu des observations tirées des figures précédentes, les données de résistivité électrique apparente et de polarisation provoquée peuvent être subdivisées en trois principaux domaines (Fig. 6.30) :

- le domaine 1 vers l'ouest, où les valeurs de résistivité et de chargeabilité sont élevées et où les valeurs de l'indice *Facteur Métal* sont faibles;
- le domaine 2 au centre de la carte, où les valeurs de l'indice *Facteur Métal* sont élevées et celles de résistivité électrique apparente et de chargeabilité sont faibles;
- le domaine 3 au sud-est de la carte, où les valeurs de résistivité électrique apparente sont modérées et celles de chargeabilité sont élevées. Dans ce domaine, les valeurs de l'indice *Facteur Métal* sont également élevées.

La hausse significative des valeurs de résistivité électrique apparente et de chargeabilité des domaines 1 et 3 serait causée par la faible épaisseur de mort-terrain et par la nature plus résistive du socle rocheux sédimentaire. Dans ces secteurs de la propriété, la signature géoélectrique du terrain est nettement dominée par le substrat rocheux qui est localement riche en sulfures disséminés (pyrite, galène, etc..).

Koita (2011) a estimé la profondeur d'investigation théorique du levé d'*Edwin Gaucher et Associés* comme étant de l'ordre de 18 mètres. De ce fait, les zones où le mort-terrain dépasse 18 mètres ne devraient pas être prises en compte dans l'évaluation de cibles d'exploration basée sur les données de ce levé de polarisation provoquée. Le domaine 2 correspond à ce type de zones avec une épaisseur de mort-terrain pouvant localement atteindre 76 mètres (voir données de réfraction sismique). C'est ce mort-terrain épais et relativement conducteur qui cause les faibles valeurs de résistivité électrique apparente observées.

Étant donné que les valeurs de l'indice *Facteur Métal* varient en fonction de la chargeabilité et inversement de la racine carrée de la résistivité électrique, la présence d'anomalies de l'indice *Facteur Métal* dans la zone de forte épaisseur de dépôts glaciaires pourrait s'expliquer par la présence de phénomènes de chargeabilité impliquant des processus membranaires associés à la matrice argileuse saturée en eau du till glaciaire et par la nature faiblement résistive des dépôts quaternaires dans cette partie de la propriété. Toutefois, comme le montre la figure 6.28, les valeurs de chargeabilité sont négligeables dans le domaine 2 impliquant que les valeurs de l'indice *Facteur Métal* sont essentiellement contrôlées par la nature faiblement résistive du mort-terrain.

Ces anomalies ne peuvent être associées au socle rocheux car ce dernier est beaucoup trop profond dans le secteur du domaine II. Nous pouvons donc en déduire que les **anomalies PP4 à PP15** (Fig. 6.30) seraient principalement causées par ce mort-terrain.

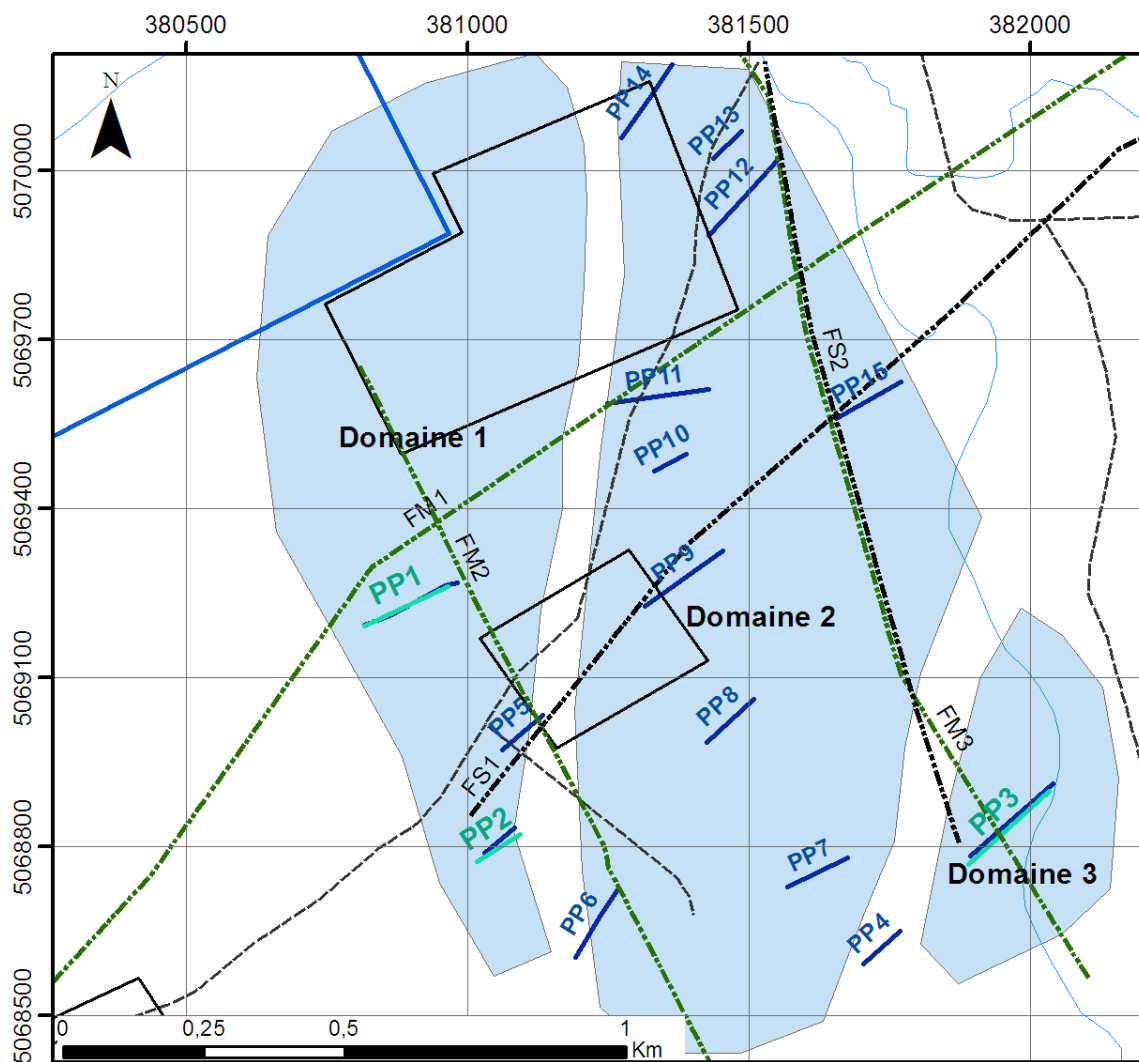


Figure 6.30 : Différents domaines issus des cartes de résistivité électrique apparente, de chargeabilité et de l'indice *Facteur Métal*.

À l'opposé, les **anomalies PP1, PP2 et PP3** sont situées dans des secteurs de la propriété (domaines 1 et 3) où l'épaisseur de mort-terrain ne dépasse pas 15 mètres. La signature géoélectrique de la couverture quaternaire dans ces secteurs est donc supposément beaucoup moins importante que pour le domaine 2.

Pour le levé de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés, nous pouvons considérer que le domaine 1 présente un intérêt certain pour l'exploration puisqu'il passe par les zones minéralisées Centre et Nord et que beaucoup de veines de quartz minéralisées et de dykes felsiques ont été retrouvés dans cette partie de la propriété. Le domaine 3 se situe, quant à lui, dans une zone où très peu de travaux d'exploration ont été effectués (Fig. 6.31).

L'anomalie de polarisation provoquée PP1 se situe au voisinage de deux veines de quartz dans lesquelles très peu de minéralisation ont été observées. Toutefois, sachant que les minéralisations dans la propriété St-Robert sont le plus souvent observées dans les épontes de roches sédimentaires ou intrusives, il est probable qu'une zone minéralisée plus importante soit présente sous la mince couche de mort-terrain. Notez qu'aucun forage n'a été effectué près de cette anomalie. Sa localisation proche des failles magnétiques FM2 et FM1 fait d'elle une anomalie digne d'intérêt et devrait être contrôlée par forage ou décapage du mort-terrain.

L'anomalie PP2 est située près d'un affleurement de shales contenant beaucoup de pyrite et est recoupée par des dykes rhyolitiques. Aucun forage n'a été effectué dans cette zone mais la présence de cet affleurement pourrait expliquer en partie cette anomalie.

L'anomalie PP3, située dans le domaine 3, intercepte la faille FM3. De plus les anomalies EM-TBF V50 et V8 et l'anomalie magnétique M10 sont assez proches de cette anomalie. Aucun forage n'a été effectué dans cette partie de la propriété et les valeurs de l'indice Facteur Métal sont élevées. Il serait nécessaire d'effectuer un forage afin de caractériser au mieux cette importante zone anomalique.

6.1.4.3 Levé de polarisation provoquée de *Phoenix Géophysics inc.* (1983)

Compte tenu de l'épaisseur de mort-terrain dans la partie centrale de la propriété St-Robert et de la présence d'une masse intrusive probablement profonde, *Les Mines JAG Itée* avait mandaté *Phoenix Geophysics inc.* pour réaliser un levé de résistivité électrique et de polarisation provoquée plus pénétratif que celui réalisé par *Edwin Gaucher et Associés*. Pour ce faire, un espacement inter-électrode de 90 mètres et des séparations $n=1$ à $n=5$ ont été utilisés pour augmenter la pénétration verticale du levé qui fut également réalisé en mode dipôle-dipôle.

Pour la réalisation de ce levé, *Phoenix Geophysics inc.* a utilisé un récepteur Phoenix IPV-3 (*Spectral IP Receiver*) et les fréquences utilisées vont de 1/32 à 1024 Hz. La figure 6.32 présente la grille du dispositif du levé de *Phoenix Geophysics inc.* Contrairement au levé d'*Edwin Gaucher et Associés* ce dispositif est mieux centré sur l'ensemble de la superficie de la masse intrusive.

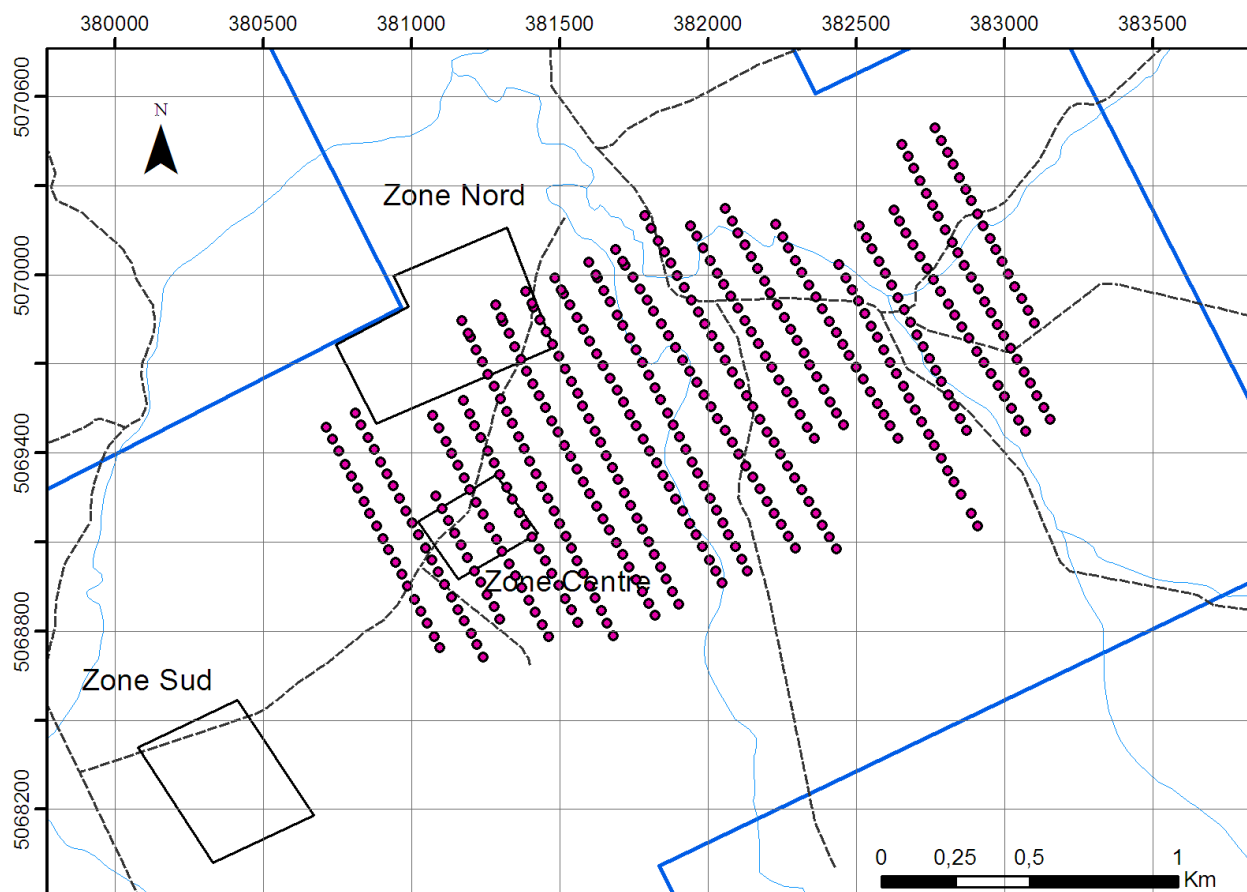


Figure 6.32 : Grille du levé de résistivité électrique et de polarisation provoquée de *Phoenix Géophysics inc.* (1983).

(a) Résultats et interprétations

La figure suivante montre l'étalement des valeurs de résistivité électrique apparente pour des séparations $n=1$ à 5 (Fig. 6.33). Dans l'ensemble, les données de résistivité électrique apparente augmentent de $n=1$ à $n=3$ ce qui démontre la présence de matériaux géologiques de plus en plus résistifs en fonction de l'accroissement de la profondeur d'investigation du levé ($n=1$ étant moins profond que $n=2$, $n=3$ etc., ...). Pour $n=1$, la faible pénétration verticale du levé implique une forte contribution des tills glaciaires et des sols variablement saturés d'eau. Cette interprétation est validée par les données de réfraction sismique qui montrent un épaissement de la couverture glaciaire dans les zones électriquement moins résistives et par les données du levé de polarisation provoquée d'Edwin Gaucher et Associés.

De $n=3$ à $n=5$ les valeurs de résistivité augmentent très légèrement, ce qui suggère la présence de matériaux relativement isotropes sous la couverture de sédiments quaternaires (ex. forte épaisseur de grès).

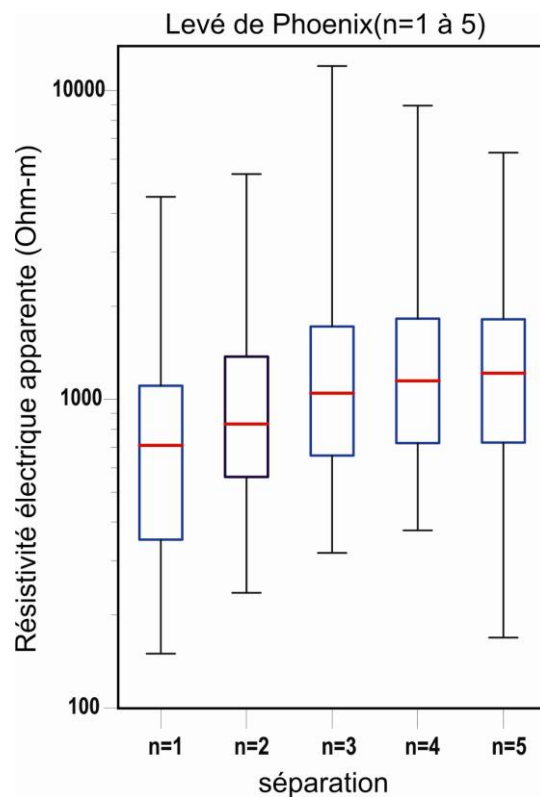


Figure 6.33 : Étalement des valeurs de résistivité électrique apparente pour des séparations de $n=1$ à 5. Les lignes rouges correspondent aux moyennes.

La figure 6.34 présente les cartes des valeurs interpolées de résistivité électrique apparente pour des séparations de $n=1$ à 5 et le tracé de la zone d'épaississement du mort-terrain provenant des données de réfraction sismique. D'une façon prévisible, ces cartes montrent des valeurs devenant de plus en plus résistives avec l'augmentation de la séparation n (mesures plus profondes).

Tout comme pour le domaine 2 du levé d'Edwin Gaucher et Associés, le secteur au sud et sud-est de la zone minéralisée centrale est marqué par la présence de faibles valeurs de résistivité électrique apparente (en bleu sur les cartes) reflétant la présence de l'imposante couverture glaciaire. L'étendue de cette zone de faibles valeurs de résistivité électrique apparente tend à se résorber en fonction de l'augmentation de la séparation (n) et donc de l'augmentation de la pénétration verticale du levé (Fig. 6.34). De plus, de $n=2$ à $n=5$ les données deviennent très résistives dans les parties nord et nord-est des cartes. Ceci témoigne d'une signature électrique dominée par les roches sédimentaires ou intrusives à partir de $n = 2$.

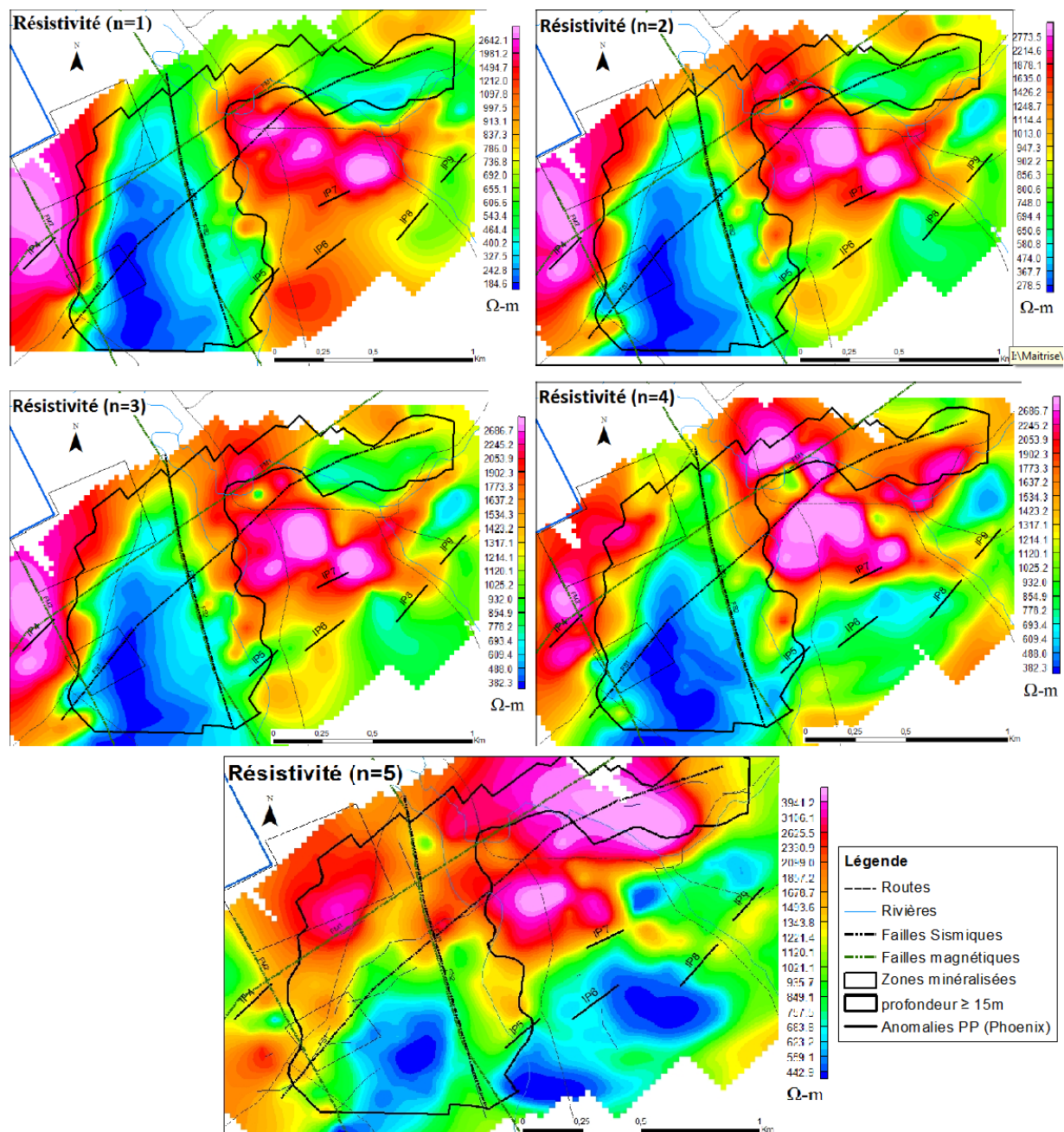


Figure 6.34 : Cartes des valeurs de résistivité électrique apparente pour les séparations de $n=1, 2, 3, 4$ et 5 . Données provenant du levé de Phoenix Geophysics inc.

Les histogrammes de la figure 6.35 résument bien l'augmentation des valeurs de résistivité électrique apparente observées en fonction de la séparation ($n=1$ vs $n=5$). Notez que pour la plus grande profondeur d'investigation ($n=5$) très peu de données sont comprises entre 0 et 500 Ohm-m. Ceci montre que les mesures pour $n=5$, sont beaucoup moins affectées par la présence du mort-terrain et que des signatures géoélectriques de plus en plus profondes sont détectables par cette méthode géophysique.

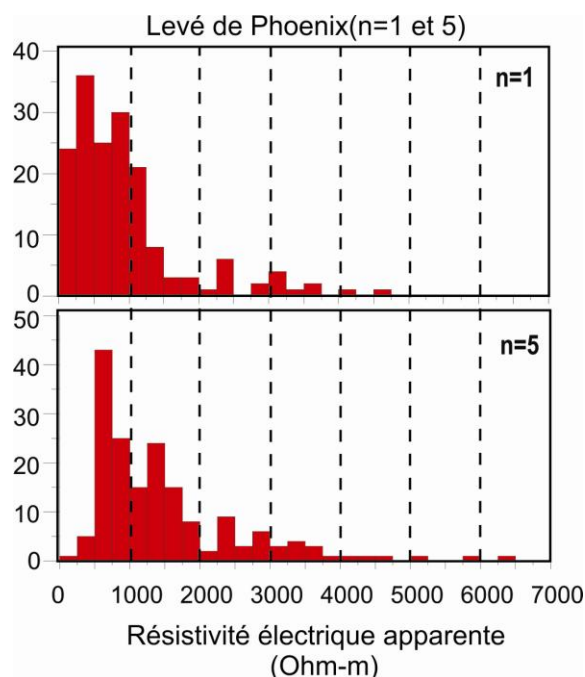


Figure 6.35 : Histogrammes des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour des séparations n de 1 et 5.

La figure 6.36 démontre que d'une façon générale les valeurs de chargeabilité augmentent en fonction de la séparation n (de 1 à 5). Les valeurs moyennes sont de 10 à 12 msec pour $n=1$ et $n=2$ et augmentent de 17 à 23 msec pour $n=3$ à $n=5$. Les plus faibles valeurs observées pour $n=1$ et $n=2$ sont probablement causées par un effet de dilution par la couche de mort-terrain (plus faible chargeabilité). D'un autre côté, la figure décrit relativement peu de variabilité des données de l'indice *Facteur Métal* en passant de $n=2$ à $n=5$.

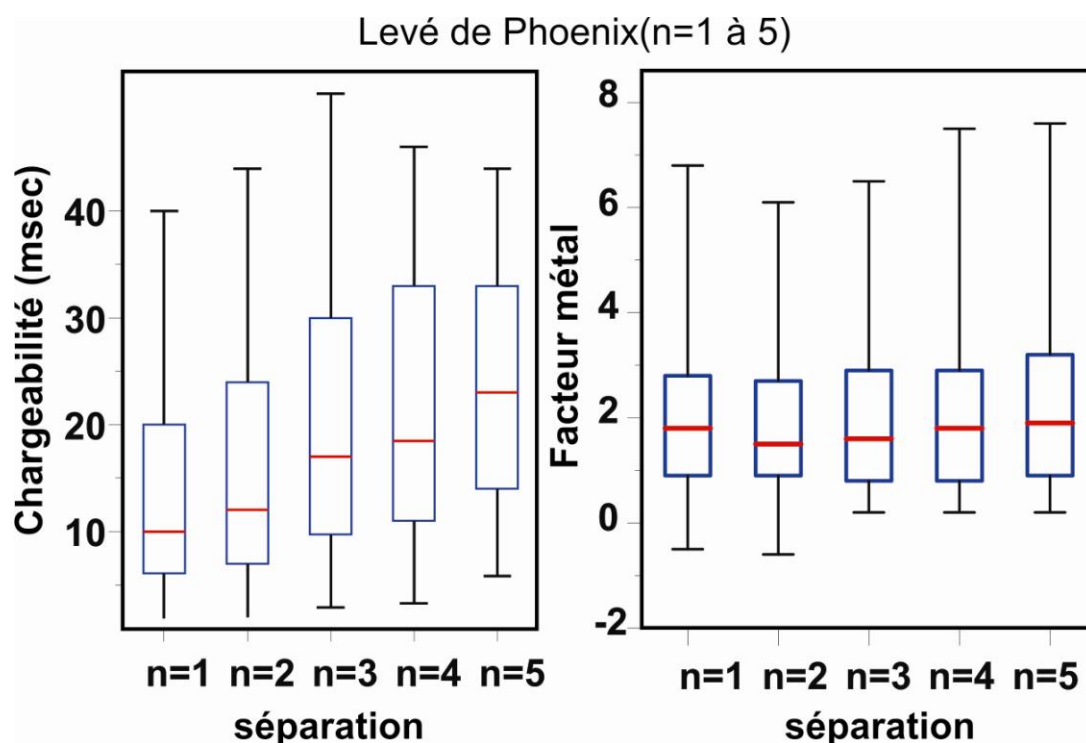


Figure 6.36 : Étalement des valeurs de chargeabilité et de l'indice Facteur Métal pour des séparations de n=1 à 5. Les lignes rouges correspondent aux moyennes. Données du levé de Phoenix Geophysics inc.

La figure 6.37 présente la variabilité des valeurs de chargeabilité en fonction de la séparation de n=1 à 5. Dans l'ensemble, les valeurs de chargeabilité augmentent dans les secteurs les plus résistifs et diminuent dans les zones peu résistives associées à l'épaisse couverture glaciaire. Sur les cartes de chargeabilité, nous pouvons noter trois domaines distincts : deux avec des valeurs de chargeabilité élevées séparées par un domaine avec de faibles valeurs de chargeabilité (Fig. 6.37). Les fortes valeurs de chargeabilité sont observées au sud-est de la masse intrusive dans un secteur relativement peu exploré par forage et à l'ouest des zones minéralisées centre et nord. La probabilité d'intersecter des sulfures dans ces parties de la propriété serait élevée.

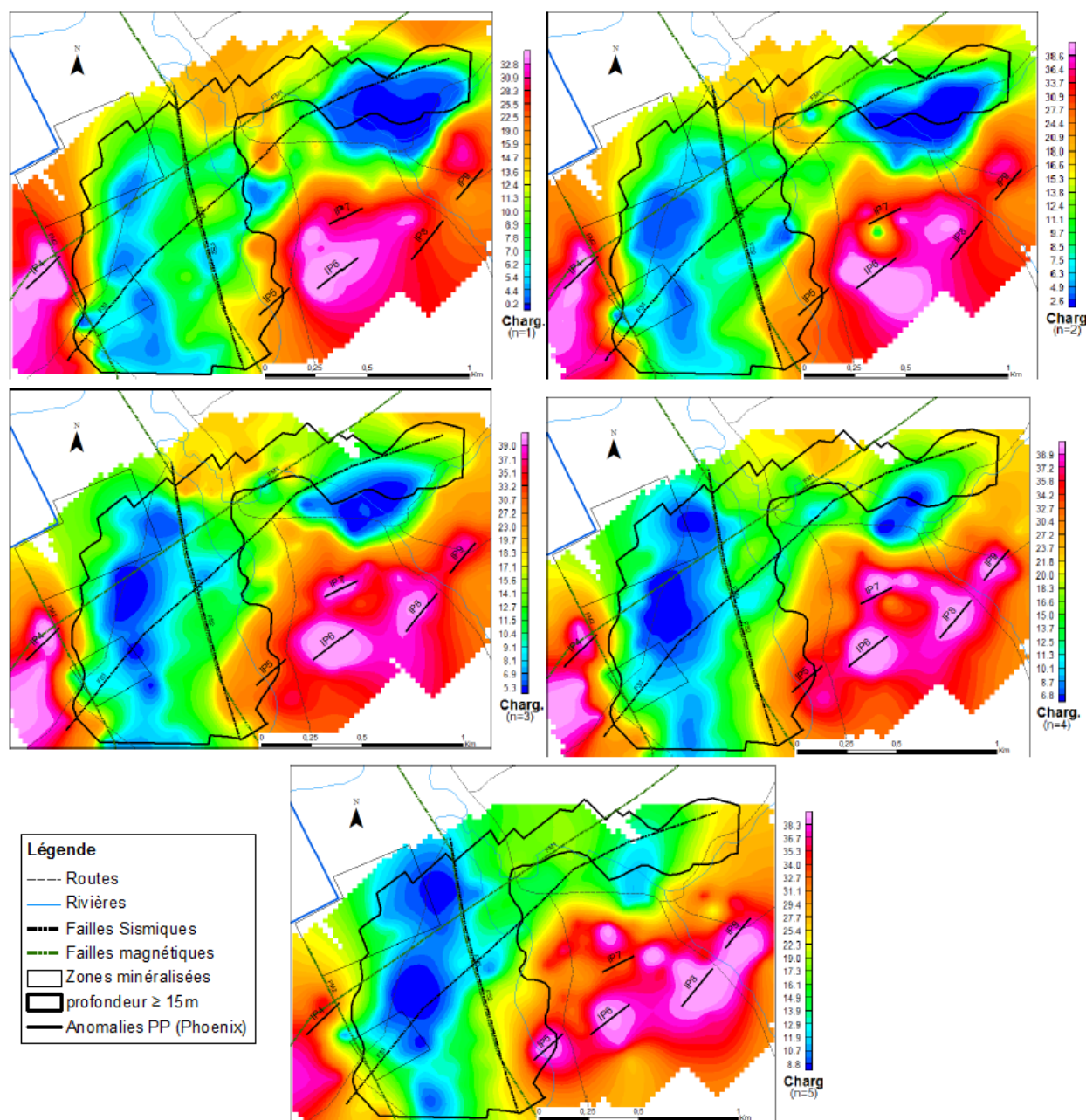


Figure 6.37 : Cartes des valeurs de chargeabilité pour n=1, 2, 3, 4 et 5. Données provenant du levé de Phoenix Geophysics inc.

Dans l'ensemble, les valeurs de l'indice *Facteur Métal* sont plus élevées dans la partie sud-est de la propriété et ce pour les séparations de n=1 à 5 (Fig. 6.38). Ce secteur est caractérisé par la présence de plusieurs anomalies linéaires de chargeabilité qui pourraient souligner la présence d'importantes zones minéralisées sulfurées.

Toutefois, ces valeurs élevées l'indice *Facteur Métal* pourraient en partie s'expliquer par de plus faibles valeurs de résistivité électrique apparente dans ce secteur. La baisse des valeurs de résistivité électrique apparente ne peut cependant être imputée uniquement au mort-terrain puisque dans cette partie de la propriété les données sismiques indiquent moins de 10 mètres de dépôts glaciaires.

De plus, la profondeur d'investigation de ce levé est beaucoup plus importante que la profondeur de mort-terrain observée. Il est probable que la proportion de shales et de mudstones soit plus importante dans cette partie de la propriété, ce qui expliquerait la diminution des valeurs de résistivité électrique apparente. Comme l'indiquent les données d'imagerie tomographique géoélectrique dans ce secteur, une couche de roches relativement conductrices (résistivité de l'ordre de 120 à 200 ohm.m) est présente jusqu'à une profondeur de 150 mètres. Sous cette unité, des roches beaucoup plus résistives sont présentes (environ 1500 ohm.m, voir section 6.2.2.3). Compte tenu de ces observations, les hautes valeurs de l'indice *Facteur Métal* dans ce secteur reflètent la combinaison de fortes valeurs de chargeabilité et de plus faibles valeurs de résistivité électrique des roches.

À l'opposé, la zone d'épaississement de la couverture glaciaire située à l'est de la zone centrale est marquée par la présence d'anomalies de l'indice *Facteur Métal* observable pour $n = 1$ et 2. De ce fait, nous pouvons en déduire que cette signature particulière serait principalement issue de la présence du mort-terrain électriquement plus conducteur.

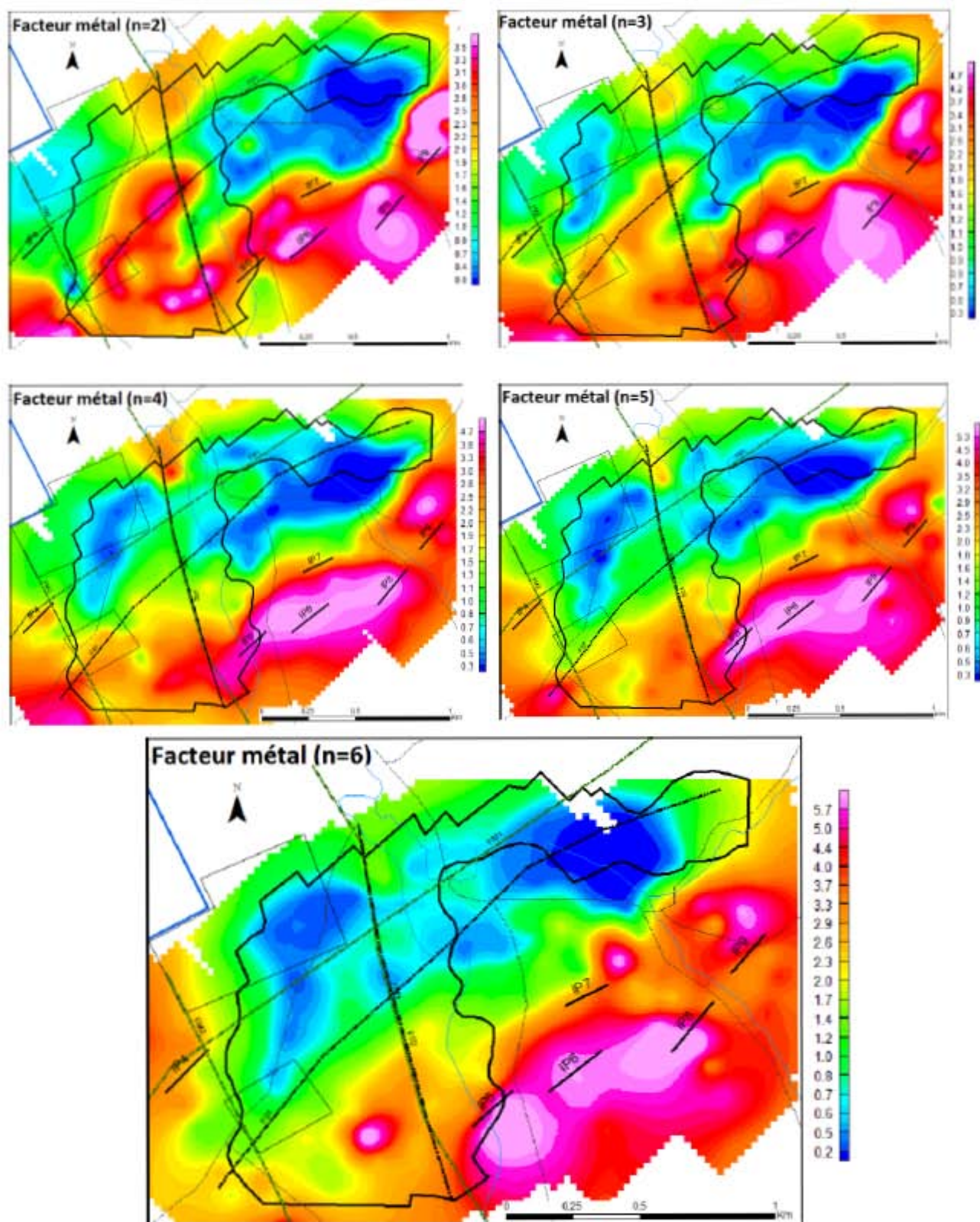


Figure 6.38 : Cartes des valeurs de l'indice *Facteur Métal* pour n= 2 à 6.

La carte de compilation de la figure 6.39 montre que les principales anomalies du levé de Phoenix Geophysics inc. sont situées dans la partie sud-est de la carte. Ces anomalies sont systématiquement parallèles au grain tectonique appalachien et situées directement au sud-est de l'intrusion de St-Robert. Ce secteur contient de plus un bon nombre d'anomalies EM-TBF et magnétiques. Malheureusement, très peu de forage et d'analyses ont été effectués dans cette zone et quasiment aucun affleurement rocheux n'est visible du fait de la nature forestière et du faible dénivelé topographique de ce secteur. Cette zone devrait impérativement faire l'objet de travaux d'exploration plus poussés incluant, entre autres, un levé pédogéochimique.

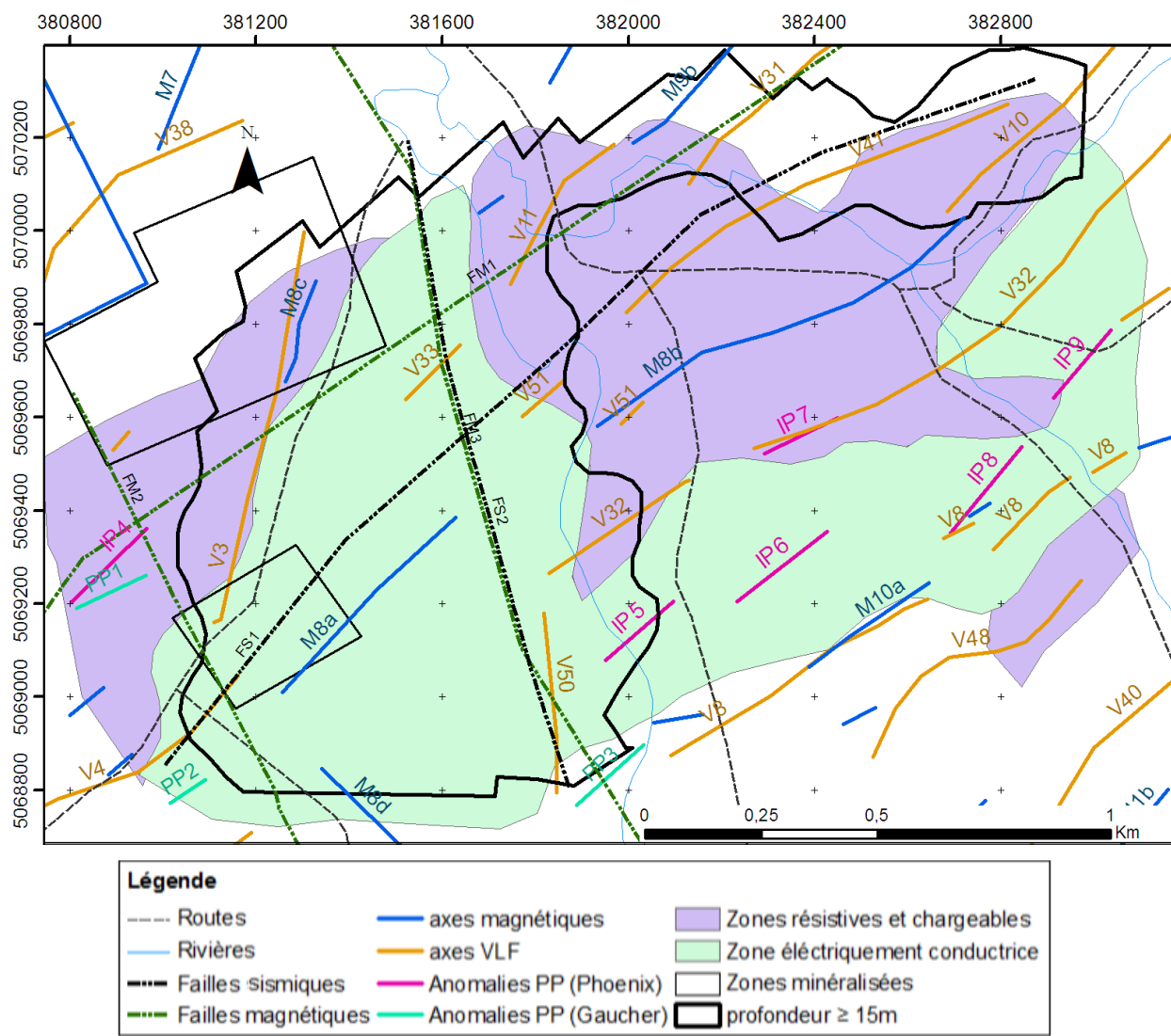


Figure 6.39 : Carte de compilation des anomalies magnétiques, EM-TBF, de polarisation provoquée issue des levés d'Edwin Gaucher & Associés (1981) et de Phoenix Géophysics inc. (1983).

Notez que la plupart des anomalies répertoriées par le levé de polarisation provoquée de *Phoenix Geophysics inc.* ne peuvent être caractérisées à l'aide de la géologie puisque très peu d'affleurements sont visibles dans cette partie de la propriété.

Cependant, nous pouvons remarquer que **l'anomalie de polarisation provoquée IP8** se superpose à l'anomalie **EM-TBF V8** et au **domaine magnétique M10** (Fig. 6.40) que nous avons considéré comme intéressant du fait de la présence des failles FS2 et FM3 à proximité et de nombreuses autres failles observées dans les forages réalisés dans ce secteur.

De plus, **l'anomalie de chargeabilité IP7** se superpose à **l'anomalie EM-TBF V32** située près du contact sud entre l'intrusion de St-Robert et les roches encaissantes. Une minéralisation de type skarn pourrait être présente dans ce secteur.

Enfin, **l'anomalie de polarisation provoquée IP4** se superpose à **l'anomalie de polarisation provoquée PP1** déterminée par Edwin Gaucher & Associés (1981). Ces anomalies se situent à proximité de deux veines de quartz et des failles FM2 et FM1 et sont positionnées immédiatement au nord de la zone d'intérêt pédogéochimique enrichie en Pb, Ag et Bi (Fig. 6.41).

Ces trois dernières anomalies devraient également faire l'objet d'études plus poussées.

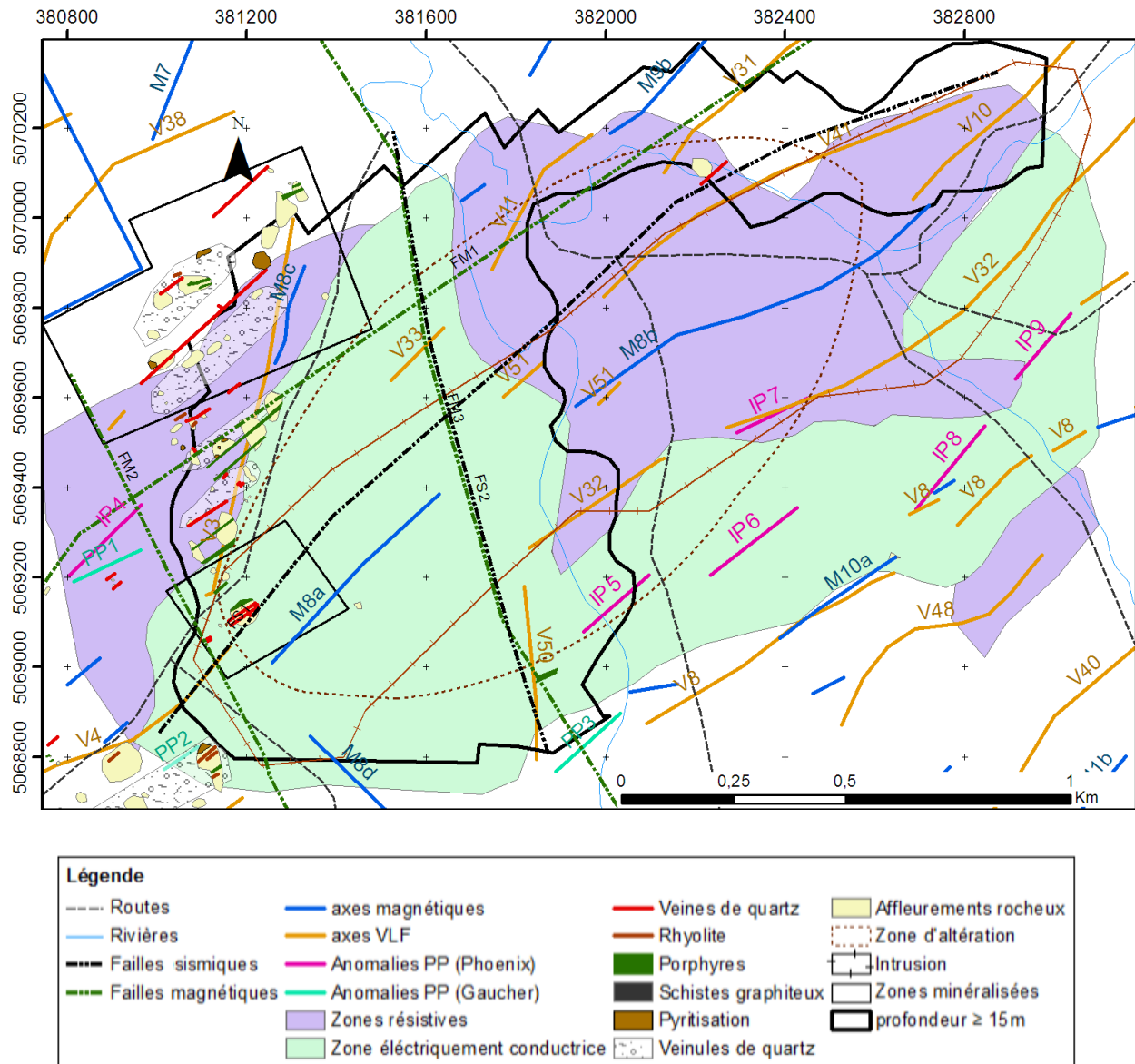


Figure 6.40 : Carte de compilation des anomalies magnétiques, EM-TBF, de polarisation provoquée issue du levé d'Edwin Gaucher & Associés (1981) et de Phoenix Géophysics inc. (1983). Ces anomalies sont superposées à la géologie de la propriété.

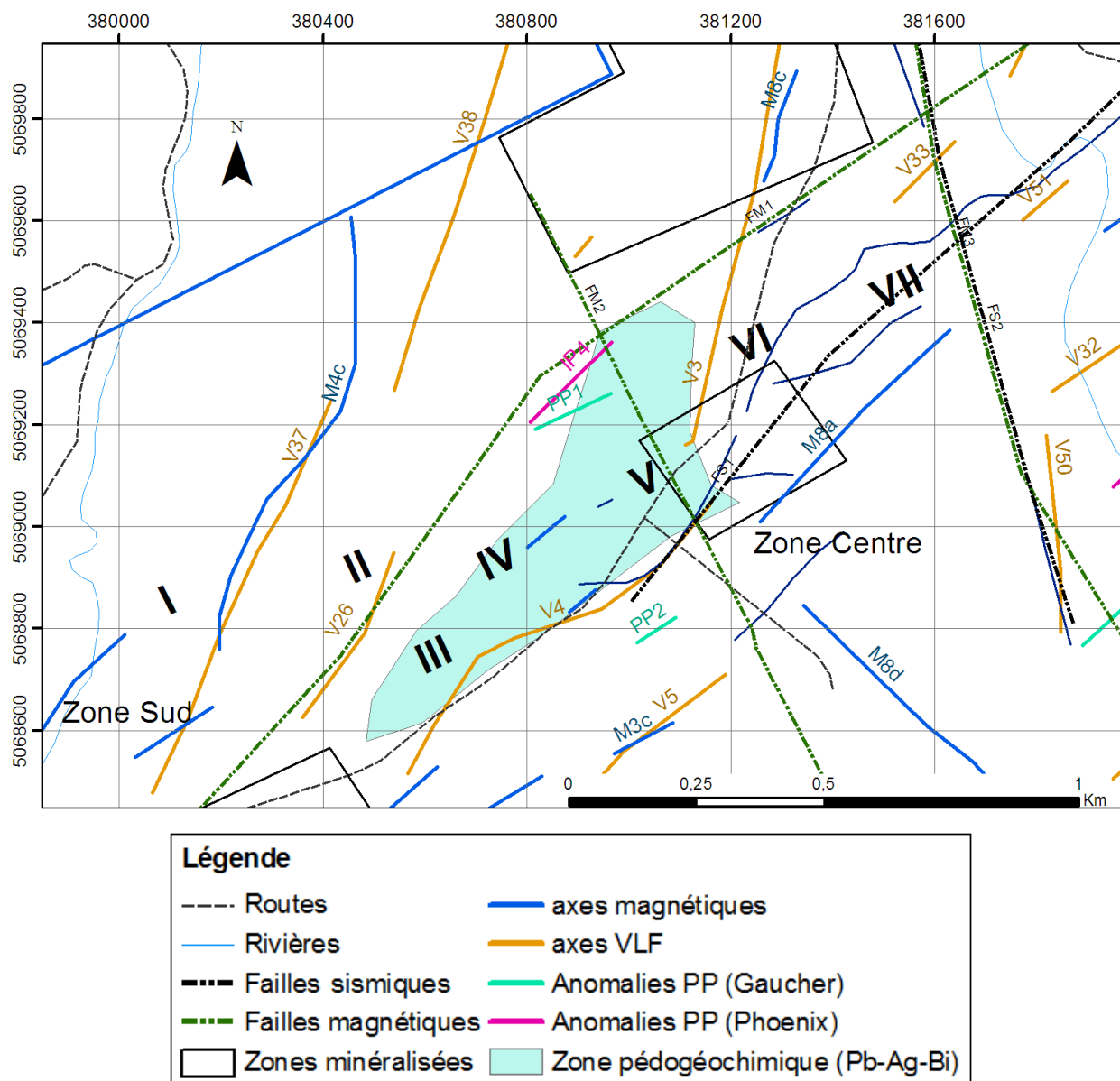


Figure 6.41 : Carte détaillée des anomalies de polarisation provoquée IP4 et PP1 et de la zone anormale en Pb-Ag et Bi du levé pédogéochimique. Les chiffres romains représentent les zones anormales déterminées à l'aide des levés de pédogéochimie.

6.2 Nouvelles données

Depuis l'hiver 2010, l'INRS a effectué plusieurs nouveaux levés géophysiques sur la propriété St-Robert. Dans cette partie du mémoire, nous allons présenter les principaux résultats des levés gravimétriques (CG5-SCINTREX) et audiomagnétotelluriques (Zonge GDP-32 et AMT). Les cartes gravimétriques ainsi que les sections audiomagnétotelluriques ont été effectuées par l'INRS.

6.2.1 Levé gravimétrique

6.2.1.1 *Principe*

Les levés gravimétriques mesurent les petites variations du champ gravimétrique causées par l'attraction des masses rocheuses sous-jacentes. La variation des valeurs de gravité peut être causée par des failles, des plis et d'autres structures géologiques.

En exploration, les levés gravimétriques sont surtout utilisés pour fournir des informations sur la géologie des roches encaissantes et des structures tectoniques associées, mais aussi pour fournir une indication directe de la présence d'un gisement. Cette dernière utilisation est possible si les densités des minéralisations d'intérêt sont significativement différentes de celles des roches encaissantes. De ce fait, on utilise souvent cette technique pour détecter les minéralisations de fer, de Pb-Zn et surtout celles associées aux sulfures massifs volcanogènes (VMS).

Pour le levé sur la propriété St-Robert, un gravimètre de type CG5 de la compagnie Scintrex (Ontario, Canada) a été utilisé (Fig. 6.42). Cette nouvelle génération de gravimètre permet une saisie des données automatisée permettant l'enregistrement de milliers de données gravimétriques pour une seule station de mesure. Ces données peuvent être ultérieurement filtrées à l'aide de transformées de Fourier afin d'éliminer les perturbations reliées à certaines vibrations du sol (ou ondes sismiques, vibrations anthropiques). Ce filtrage des données permet l'obtention de données gravimétriques de bonne qualité (Richer-LaFlèche, 2011a).



Figure 6.42 : Gravimètre CG5 (Scintrex) utilisé pour le levé gravimétrique à St-Robert.

Afin d'exploiter les données gravimétriques, plusieurs corrections doivent être effectuées (ex. Richer-LaFlèche, 2011a) :

1. Correction pour la hauteur de l'instrument;
2. Correction pour la dérive instrumentale;
3. Calcul de la gravité absolue;
4. Calcul de la gravité théorique (latitude);
5. Calcul de la correction air libre et de l'anomalie air libre;
6. Calcul de la correction de Bouguer et de l'anomalie de Bouguer;
7. Calcul des valeurs de gravité finale (ou anomalie de Bouguer complète) incluant la correction de terrain;

Le détail de ces corrections est décrit dans le rapport de Richer-Laflèche (2011a).

Les levés gravimétriques ont été réalisés sur les principaux chemins d'accès à la propriété. La figure 6.44 présente le plan de localisation des stations gravimétriques mesurées en 2010 et 2011. En parallèle, un système GPS-RTK (PROMARK 500) (Fig. 6.43) a été utilisé afin de déterminer la position à une précision centimétrique de chaque point de mesure. Notez que les données gravimétriques ont été mesurées à la surface du sol, car la répartition spatiale des affleurements rocheux est inégale et la proportion d'affleurements inférieure à 5%. Conséquemment l'effet de mort-terrain doit être tenu en considération dans l'interprétation de ces données.



Figure 6.43 : Photographie montrant la station de base RTK ProMark 500 et la station émettrice Pacific Crest utilisées pour l'arpentage à résolution centimétrique des stations gravimétriques de St-Robert.

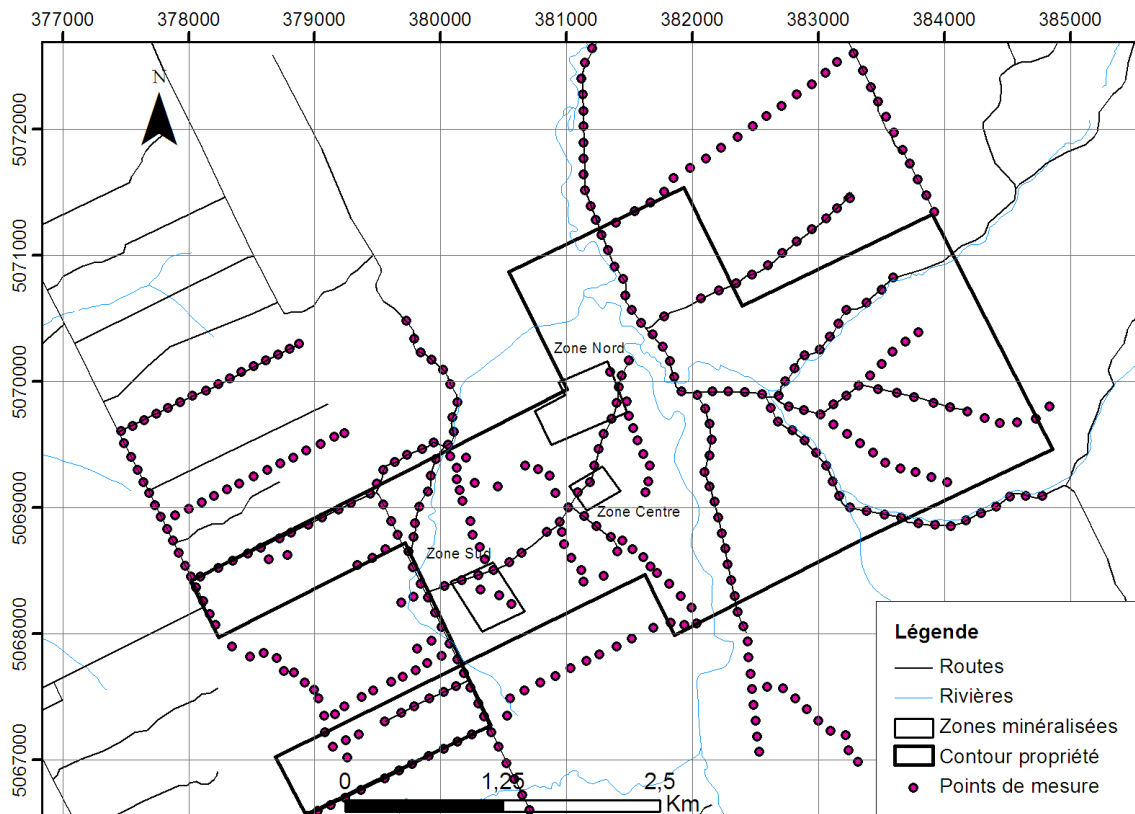


Figure 6.44 : Grille de mesure des levés gravimétriques.

Les données gravimétriques enregistrées par le gravimètre CG5 sont relatives. Pour obtenir des données absolues, nous avons utilisé la station *IGSN71* de la Commission géologique du Canada (Réseau de normalisation canadien de gravimétrie (RNCG)). La station *IGSN71* a une valeur de 980642,4300 mGal. Elle est située dans la ville Thetford Mines (Qc) et plus précisément, en bordure de l'Église catholique Saint-Alphonse. La station est située du côté de la rue King.

Pour établir la valeur de la station de base INRS de Saint-Robert Bellarmin, nous avons fait plusieurs cycles de lecture des stations *IGSN71 de la CGC* et *St-Robert-99999* dans une même journée d'acquisition. Après correction des données pour la dérive instrumentale et l'effet de marée, nous avons calculé une valeur de 980745,4349 mGal pour la station INRS *St-Robert-99999*. Notez que cette dernière est située au pied de l'escalier de l'école Bellarmin (municipalité de Saint-Robert Bellarmin) (Fig. 6.45). La coordonnée (UTM-Nad83 zone 19) de la base St-Robert-99999 est 37 6740,331 E et 50 67460,63 N et son altitude est de 447,738 m (mesure RTK-DGPS).



Figure 6.45 : Figure montrant la station de base St-Robert-99999 située sur le site de l'école Bellarmin (12 rue Nadeau). Photos : Edith Chouinard, INRS

6.2.1.2 Résultats et interprétation

L'histogramme suivant (Fig. 6.46) montre un étalement des valeurs d'anomalie de Bouguer complète de -68 à -52 mGal. Ces données reflètent la distribution des valeurs recalculées après interpolation spatiale et attribution des valeurs aux cellules couvrant l'ensemble de la carte. Les données observées sont compatibles avec l'ordre de grandeur et la distribution spatiale des données gravimétriques régionales de la Commission géologique du Canada.

Les données d'anomalie de Bouguer complète de St-Robert semblent se distribuer en trois domaines I, II et III. Le premier regroupe un nombre restreint de données avec des valeurs inférieures à -63 mgals. Le second à un regroupement de valeurs comprises entre -63 et 59 mgals et finalement le dernier à un regroupement de valeurs supérieures à -59 mgals.

Ce type de distribution de données reflète généralement la présence de domaines géologiques distincts sur les cartes régionales.

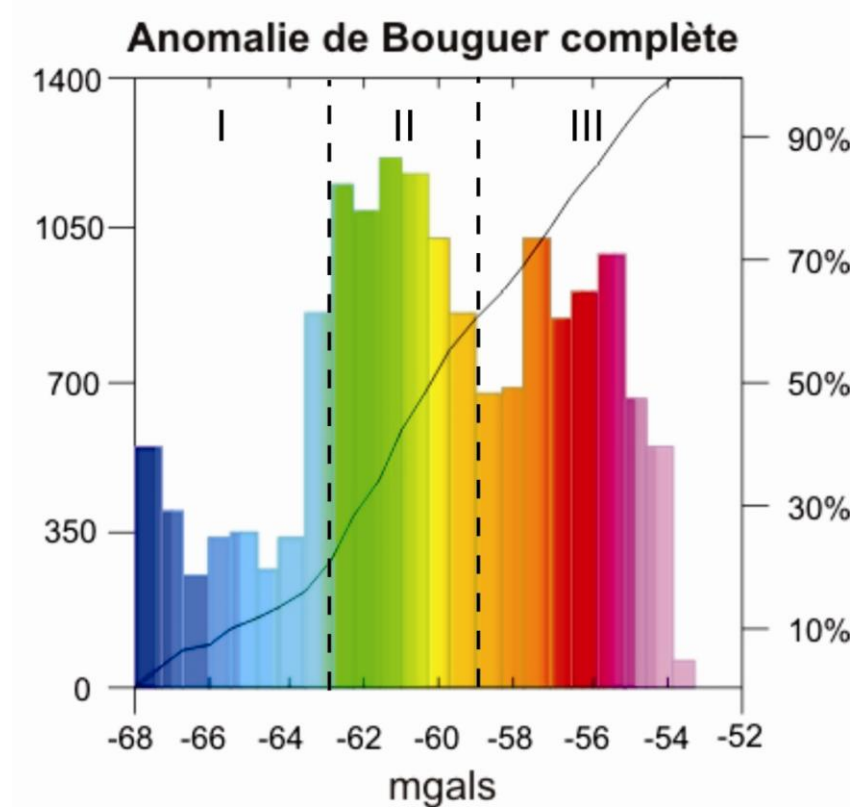


Figure 6.46 : Histogramme montrant la distribution des valeurs de l'anomalie de Bouguer complète du levé réalisé sur la propriété St-Robert.

Sur la figure 6.47 représentant l'anomalie de Bouguer complète (anomalie de Bouguer et correction de terrain), nous pouvons remarquer une variation progressive des valeurs de l'anomalie de Bouguer. Cette variation est orientée selon le grain structural des Appalaches du sud du Québec. La figure 6.47 montre des valeurs d'anomalie de Bouguer plus élevées au sud et plus faibles au nord. Cette tendance reflète probablement un changement lithologique dans le substrat rocheux, avec des roches plus denses au sud qu'au nord. Toutefois, ce contraste doit affecter des roches profondes, car géologiquement les roches sédimentaires de surface sont semblables au sud et au nord.

Ce contraste gravimétrique pourrait s'expliquer par la présence d'une importante faille, orientée NE-SO, séparant deux blocs distincts. Sur la propriété St-Robert, cette zone de faille semble correspondre aux failles FS1 et FM1 préalablement discutées dans ce mémoire.

Le domaine de faibles valeurs d'anomalie de Bouguer au nord de la zone de faille principale (FS1-FM1) pourrait s'expliquer par un épaississement de la séquence de roches sédimentaires et, à l'opposé, l'augmentation des valeurs observées au sud pourrait refléter une remontée du socle précambrien présent sous les nappes de roches appalachiennes ou la présence de masses intrusives plus denses. Ce contexte tectonique serait compatible avec la présence à une dizaine de kilomètres du socle précambrien du massif de Chain Lakes (Fig. 6.48).

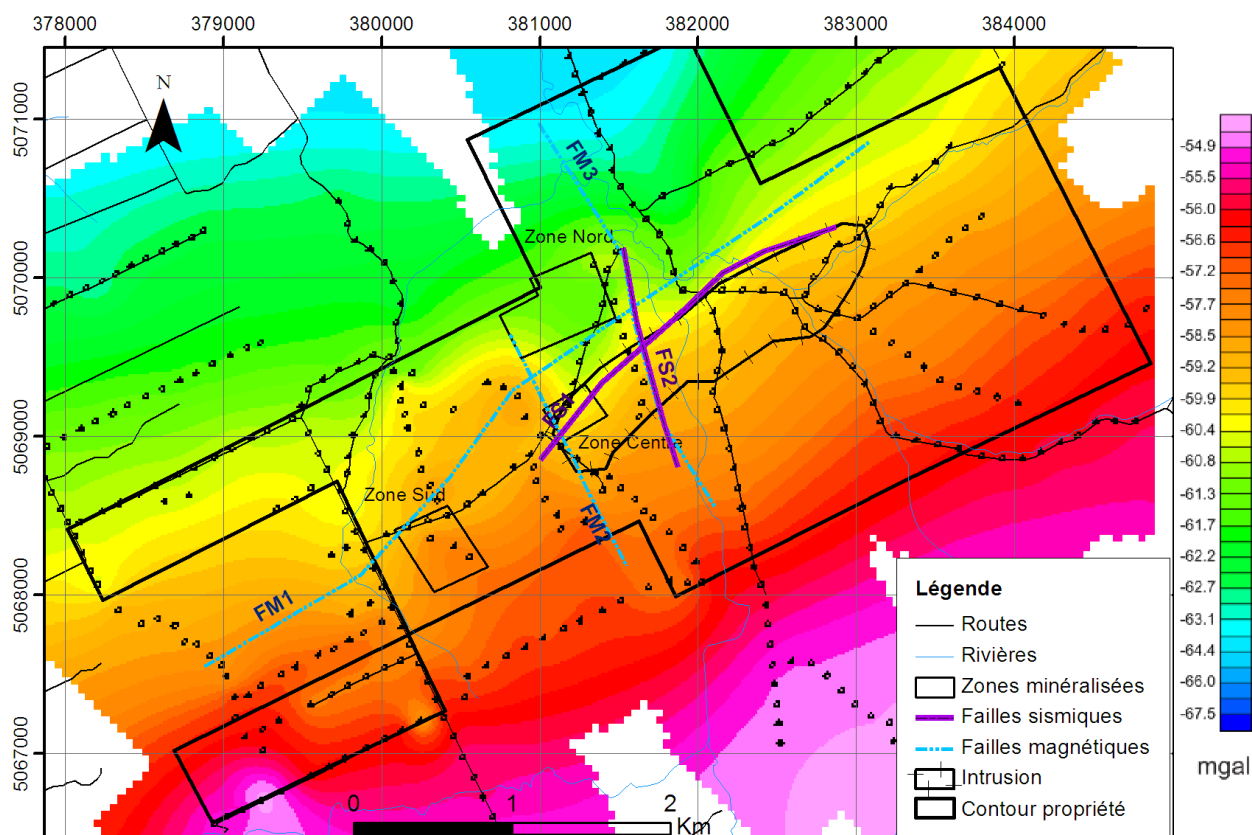


Figure 6.47 : Carte montrant la variabilité spatiale des valeurs d'anomalie de Bouguer complète. Données interpolées par krigeage et traitées par Richer-LaFlèche (inédit).

D'un autre côté l'examen attentif de la carte géologique régionale (Fig. 6.48) montre, à environ deux kilomètres à l'ouest de la propriété, la présence d'une lentille de basaltes ainsi que des gabbros de la Formation de Frontenac suggérant la possibilité de retrouver ce genre de roches au sein de la propriété. De plus, d'après la carte géologique de la région, ces volcanites suivent un axe NE-SO correspondant à une faille dont le prolongement passe sur la propriété St-Robert (Fig. 6.48). Notez que la carte du champ magnétique total ne suggère pas la présence de roches volcaniques près de la surface. Ces roches pourraient cependant être présentes sous une nappe de roches sédimentaires dévoniennes. Finalement, l'examen des données gravimétriques régionales montre que le haut gravimétrique au sud de la faille FS1-FM1 s'étend sur environ 75 kilomètres parallèlement au grain tectonique et sur environ 10 kilomètres perpendiculairement.

Ce domaine de hautes valeurs d'anomalie de Bouguer ne peut s'expliquer par la présence d'unités volcaniques, car ces dernières sont généralement intercalées à des unités de roches sédimentaires ce qui crée de l'anisotropie et tend à diminuer l'influence des roches volcaniques sur les valeurs de gravité.

Compte tenu de l'immensité de la structure responsable du haut gravimétrique, il est probable que la signature gravimétrique observée résulte d'une remontée du socle précambrien.

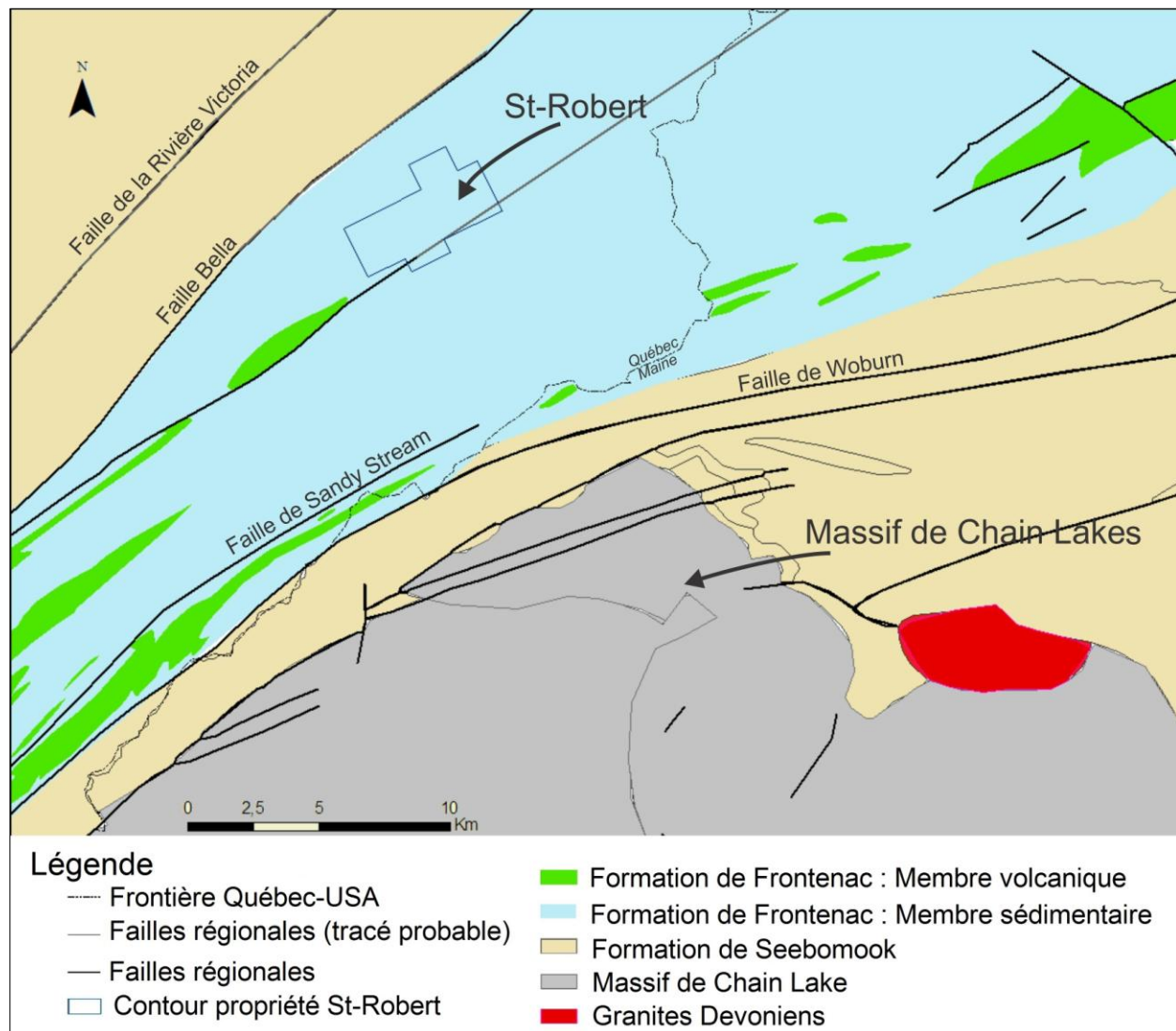


Figure 6.48 : Carte géologique simplifiée de la région de St-Robert Bellarmin. Sources : Lebel et Tremblay (1993); Hibbard et al. (2006), Lyons et al. (1997); Moench et al. (1995) et Osberg et al. (1985).

La carte de l'anomalie de Bouguer complète montre de plus des perturbations dans le secteur des zones minéralisées Centre et Nord (Fig. 6.47). Les limites ouest des zones Centre et Nord semblent affectées par un déplacement dextre perpendiculaire au grain tectonique régional. Cette perturbation locale pourrait avoir des implications métallogéniques pour expliquer la présence de minéralisations dans cette partie de la propriété. Cette faille présumée se superpose à la *faille magnétique* FM2.

À l'aide de ce levé, nous pensions être capables de visualiser plus précisément l'intrusion de St-Robert dont l'emplacement est indiqué par les données du levé magnétique.

Cependant, les résultats du levé gravimétrique ne nous ont pas permis de localiser la masse intrusive principale (Fig. 6.47). Notez que l'absence de contrastes gravimétriques implique probablement la présence de roches intrusives felsiques ayant une densité voisine de celle des roches sédimentaires locales. Ceci explique pourquoi nous avons procédé à la détermination de la densité des différents types de roches observées sur la propriété. Pour l'intrusif (non affleurant) de St-Robert, sa densité est déduite à partir de celles des dykes de porphyres injectés dans les roches sédimentaires.

Le tableau 6.3 ci-dessous montre les densités moyennes pour les différentes lithologies présentes à St-Robert. La liste des valeurs de densités des échantillons est présentée en annexe E-2.

Tableau 6.3 : Valeurs de densité moyenne pour les différents types de roche de la propriété St-Robert.

Type de roche	Densité moyenne (g/cm ³)	Écart-type (g/cm ³)
Roches intrusives	2,73	0,54
Sédiments	2,82	0,61
Veines de quartz	2,66	0,04
Veines de quartz minéralisées	3,03	0,47

Nous pouvons donc remarquer que la différence de densité entre les roches sédimentaires et intrusives ainsi que les veines de quartz est très peu marquée, de ce fait, le levé gravimétrique ne peut pas nous aider à repérer ces masses intrusives.

Néanmoins, nous pouvons observer que pour les veines de quartz minéralisées en galène, pyrite, cosalite et/ou scheelite que nous avons échantillonnées, les valeurs de densité sont plus élevées que la normale. De ce fait, il est possible que certaines anomalies gravimétriques très locales puissent indiquer la présence de minéralisations.

Étant donné la présence de nombreuses failles dans le secteur de la propriété, nous avons procédé au calcul de la dérivée verticale première pour rehausser les contrastes des perturbations gravimétriques de sources moins profondes (Fig. 6.49).

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que cette transformation des données gravimétriques fait apparaître des structures orientées NE-SO et NNO-SSE que nous n'avons pu observer jusqu'à maintenant à l'aide des autres levés géophysiques. Ces structures sont certainement très importantes et ont probablement une extension verticale profonde.

De par l'absence de différences significatives de densité entre les roches intrusives felsiques et les roches sédimentaires de la propriété, nous pouvons en déduire que les anomalies mises en évidence par la dérivée verticale de l'anomalie de Bouguer ne sont pas issues de la présence d'intrusions ou de dykes felsiques et doivent être expliquées autrement.

Compte tenu de la largeur restreinte des anomalies associées aux failles NE-SO et NNO-SSE il est probable que les contrastes de gravité observés combinent une diminution de densité des roches associées aux zones de faille et un épaissement très localisé des dépôts quaternaires au-dessus de dépressions topographiques du substrat rocheux. Ces dépôts étant moins denses que les roches appalachiennes, il en résulte une diminution des valeurs de l'anomalie de Bouguer et des valeurs de dérivée verticale négatives.

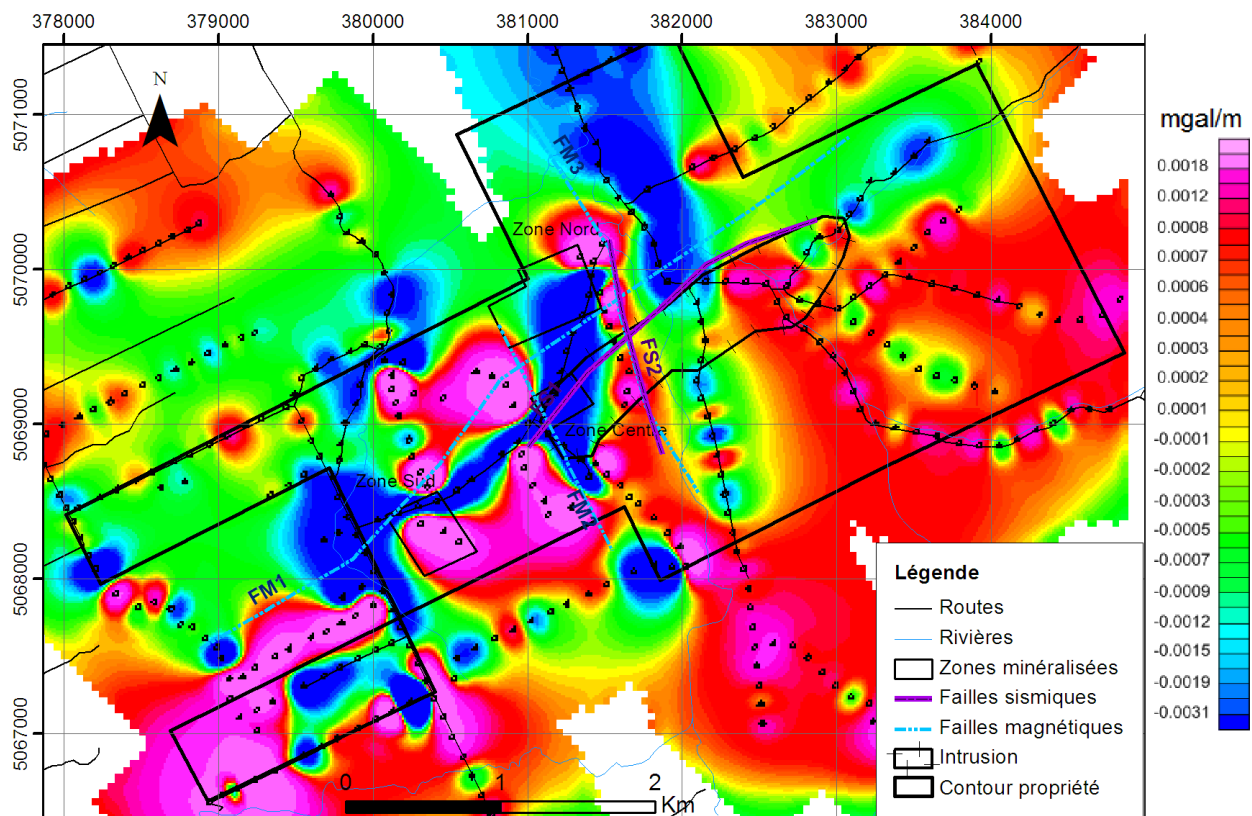


Figure 6.49 : Carte de la dérivée verticale première des valeurs de l'anomalie de Bouguer.

Au niveau de la propriété, nous pouvons noter que les zones minéralisées Centre et Nord sont situées dans un « creux gravimétrique » pouvant probablement correspondre à des failles ou zones de cisaillement variablement surmontées d'une importante couverture de dépôts quaternaires (Fig. 6.49). Toutefois, on remarque que ce n'est pas le cas de la zone Sud qui semble être située sur ou en bordure d'un haut gravimétrique.

Il est probable que cette observation explique en partie la différence d'orientation des veines minéralisées de la zone Sud par rapport à celles des zones Centre et Nord. Néanmoins, compte tenu de l'épaisseur élevée de mort-terrain au niveau des zones Centre et Nord, il est possible que la dérivée verticale de l'anomalie de Bouguer soit en partie atténuée par la présence d'une accumulation locale de dépôts glaciaires de faibles densités.

Pour plus de lisibilité, nous avons superposé les « creux » et les « hauts » de la carte de la dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer complète avec le tracé des failles inférées à partir des anisotropies des données sismiques et magnétiques (Fig. 6.50). Par la suite nous avons superposé ces données à celles des anomalies magnétiques (Fig. 6.51), EM-TBF (Fig. 6.52), de polarisation provoquée (Fig. 6.53).

Pour compléter cette comparaison, nous avons de plus projeté la localisation des domaines pédogéochimiques anomaux sur la carte de la figure 6.54.

La figure 6.50 montre la relation entre la position des failles présumées à partir des anisotropies magnétiques et sismiques (*failles magnétiques et failles sismiques*) et celles des hauts et creux gravimétriques provenant de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer complète. Sur cette carte, le corridor de la faille de St-Robert est indiqué par la position des failles *magnétique* FM1 et *sismique* FS1 et correspond à une importante dépression gravimétrique allongée selon un axe NE-SO correspondant aux creux gravimétriques FG1 et FG2. Ce creux passe dans la zone minéralisée centrale et limite vers le nord l'extension de la zone minéralisée Sud (Fig. 6.50). La faille magnétique FM2, orientée NO-SE, passe en bordure du creux gravimétrique souligné par le tracé du linéament gravimétrique FG3. Notez que l'expression « linéament gravimétrique » est utilisée dans ce chapitre simplement pour indiquer la position centrale du creux gravimétrique. Conséquemment il ne s'agit pas de linéaments structuraux même s'il est hautement probable que ces dépressions gravimétriques soient associées à la présence de failles. Notez que les zones minéralisées centrale et nord sont alignées à l'intérieur de ce creux gravimétrique.

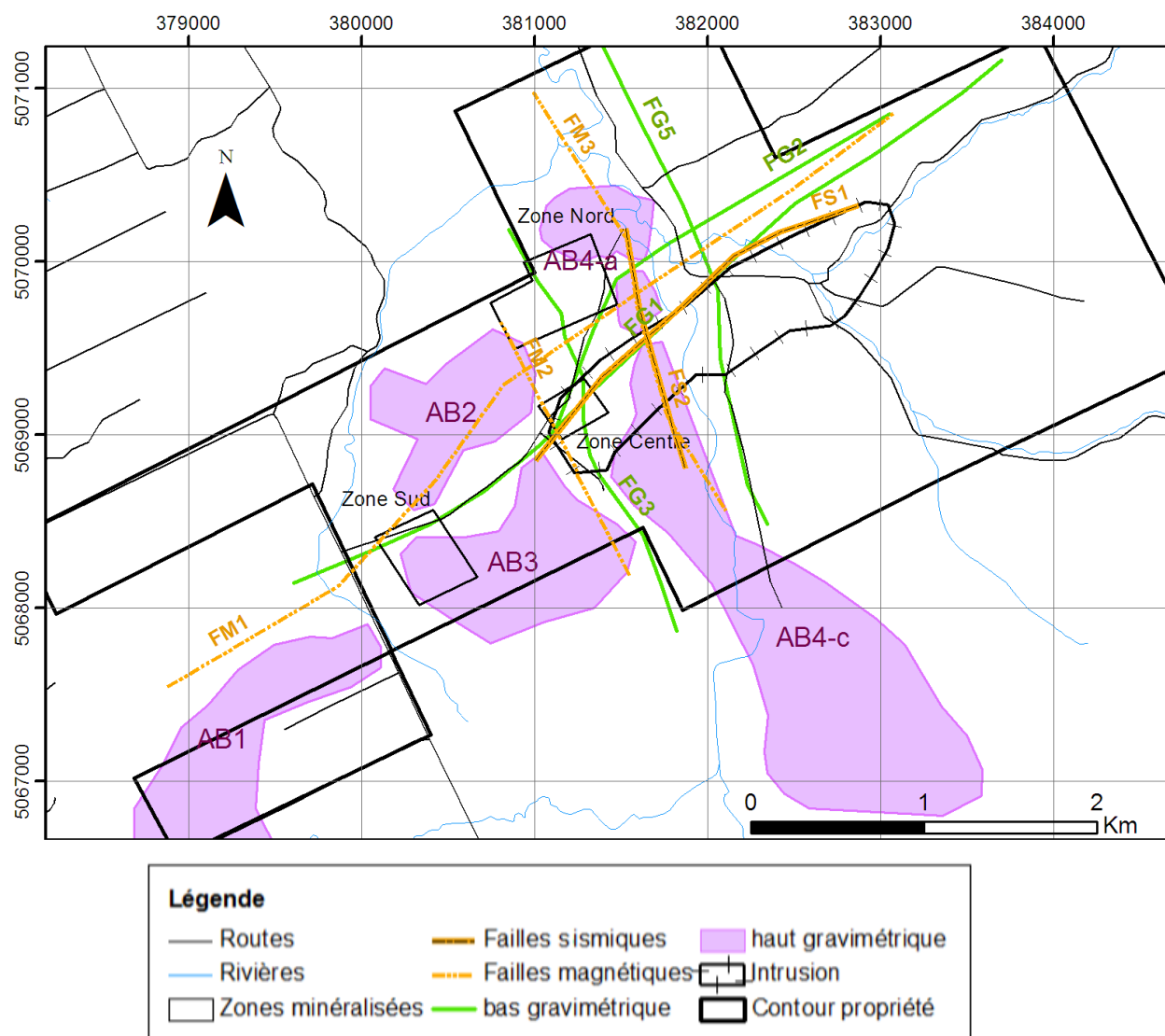


Figure 6.50 : Carte de compilation des failles magnétiques et sismiques avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

La figure 6.51 montre la relation entre les axes des anomalies magnétiques et la position des hauts et creux gravimétriques provenant de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer complète. Ce type de comparaison est important dans l'étude de données de champs potentiels, car dans de nombreux bassins de roches supracrustales, les données magnétiques et de gravité sont souvent corrélées, car la densité et la susceptibilité magnétique des roches sont souvent positivement corrélées. Par exemple, dans un contexte volcano-sédimentaire cette relation est plus qu'évidente. Notez que dans le cas de St-Robert, les hauts gravimétriques ne correspondent généralement pas aux zones à fortes valeurs de champ magnétique total.

L'intrusion de St-Robert, marquée par de fortes valeurs de champ magnétique total, est essentiellement associée à une légère dépression gravimétrique visible sur la carte de la dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer. Dans un tel contexte, il ne serait pas approprié de procéder à la production de cartes de pseudo-gravité à partir des données des levés magnétométriques. De plus, la carte de compilation de la figure 6.51 montre seulement cinq anomalies magnétiques situées dans des hauts gravimétriques pour plus de 25 anomalies situées dans des creux gravimétriques.

Sur la propriété St-Robert, il semble que plusieurs des failles à forte *expression gravimétrique* ne semblent pas préférentiellement associées à une injection de dykes felsiques. Certaines de ces failles pourraient être postérieures la mise en place des dykes.

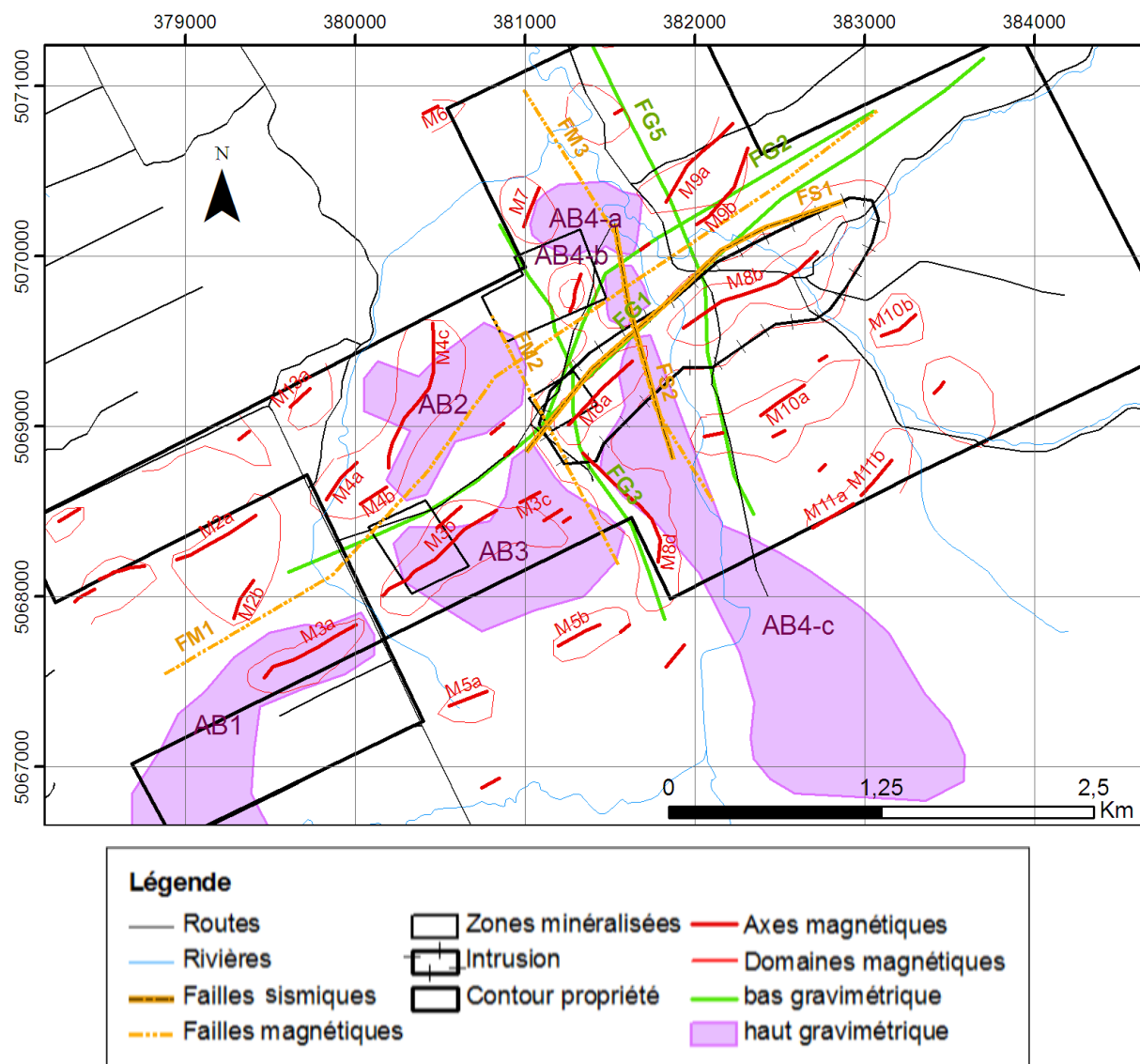


Figure 6.51 : Carte de compilation des anomalies magnétiques avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

La figure 6.52 montre la relation entre les axes des anomalies de haute conductivité électrique du levé EM-TBF (anomalies superficielles) et celles de la dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer complète. Dans l'ensemble la carte ne montre pas de fortes corrélations entre la présence des anomalies gravimétriques et celles de conductivité électrique (EM-TBF). Ceci reflète la pénétration extrêmement superficielle des données EM-TBF par rapport à la forte pénétration verticale des données gravimétriques.

Les anomalies EM-TBF sont distribuées uniformément sur l'ensemble du périmètre de la propriété. Toutefois, localement la carte de compilation de la figure 6.52 montre une inflexion de la trajectoire de certaines anomalies EM-TBF au voisinage du *linéament gravimétrique* FG3 orienté NO-SE et associé au creux gravimétrique passant par les zones minéralisées Centre et Nord. De la même façon, certaines anomalies EM-TBF orientées NE-SO semblent se concentrer entre les linéaments gravimétriques FG1 et FG2 longeant la zone de faille de St-Robert indiquée par la trajectoire des failles sismique FS1 et magnétique FM1.

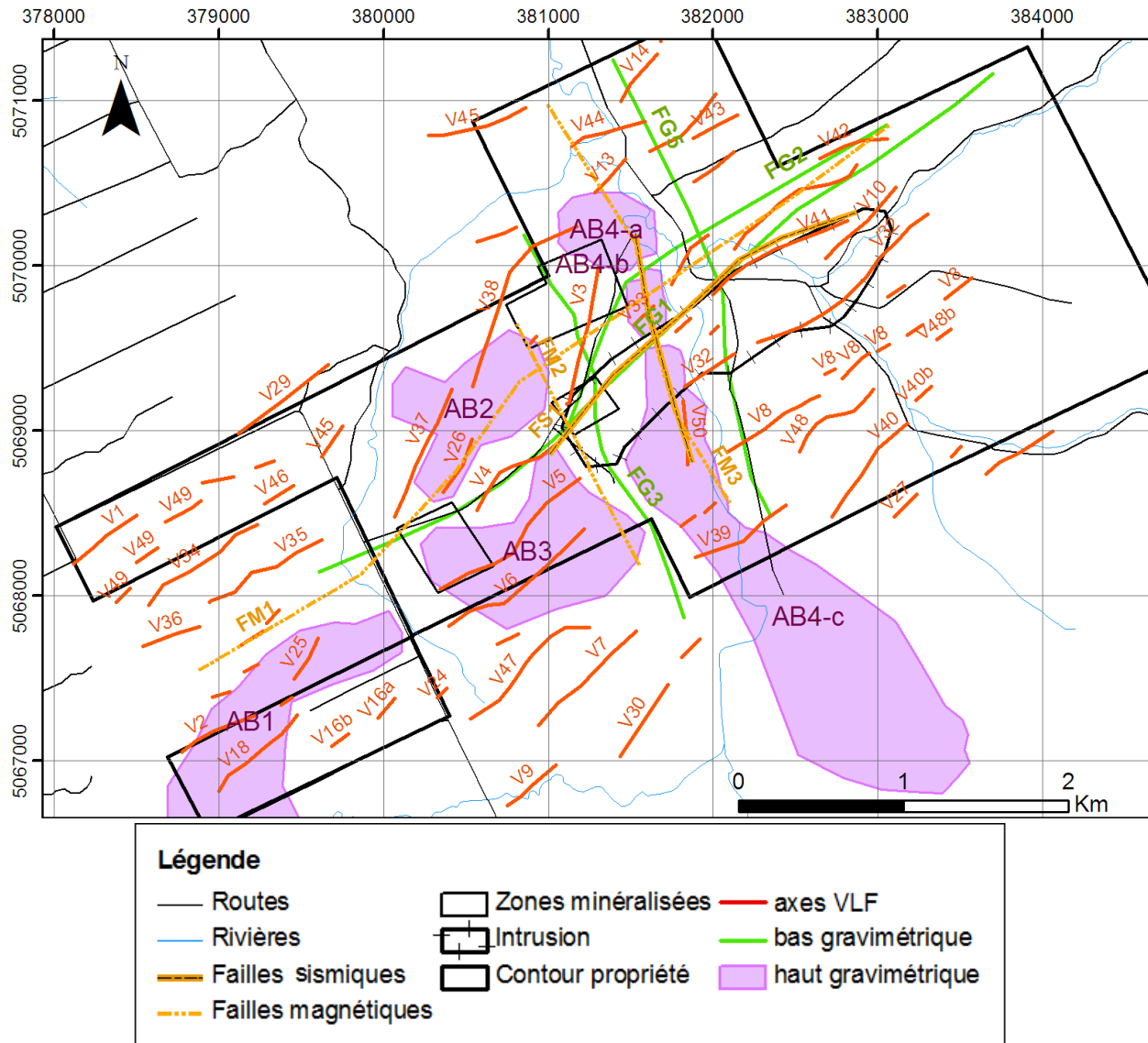


Figure 6.52 : Carte de compilation des anomalies EM-TBF avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

La figure 6.53 montre la relation entre les axes des anomalies de polarisation provoquée et celles de la dérivée verticale première des valeurs de l'anomalie de Bouguer complète. Dans l'ensemble, la carte ne montre pas la présence d'anomalies de polarisation provoquée alignées dans la direction des linéaments gravimétriques NO-SE (FG3 et FG5). D'un autre côté, plusieurs anomalies de chargeabilité sont situées près des linéaments gravimétriques FG1 et FG2 qui sont orientés parallèlement au grain tectonique. Ces anomalies de chargeabilité sont de plus situées à proximité de la zone de faille de St-Robert soulignée par le tracé des failles *magnétique* FM1 et *sismique* FS1.

Par exemple, l'**anomalie de chargeabilité PP9** est intéressante, car elle passe par la zone minéralisée centrale. De plus cette anomalie de chargeabilité est située dans la zone potentiellement aurifère de la propriété St-Robert.

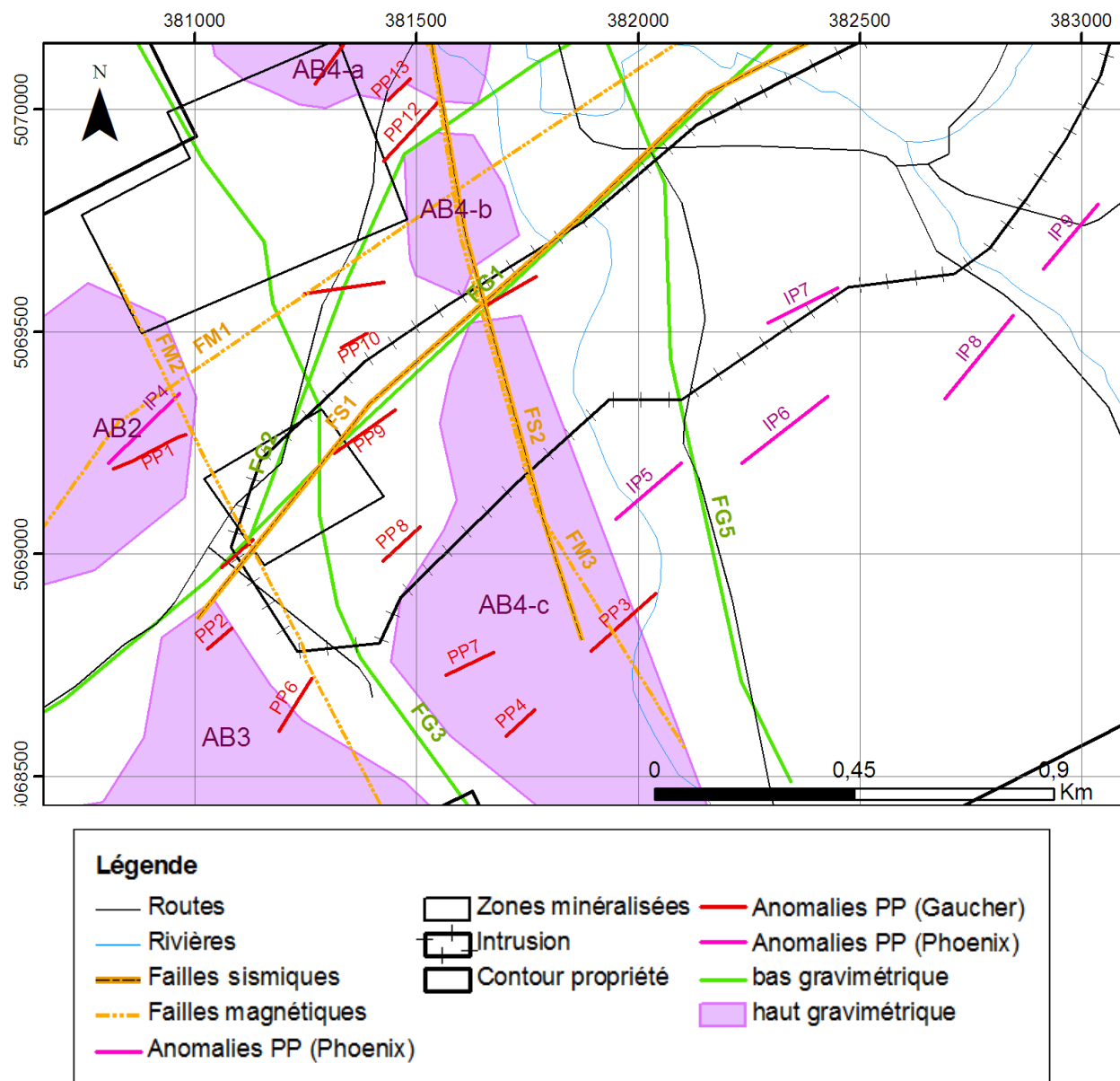


Figure 6.53 : Carte de compilation des anomalies de polarisation provoquée induite avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

La figure 6.54 montre la relation entre la position des domaines pédogéochimiques anormaux en Au, Bi, Pb, W, Ag et Bi et celle des « creux » et « hauts » de la carte des valeurs de la dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

Dans un premier temps, on peut observer un alignement des principaux domaines pédogéochimiques anomaux dans le corridor de la zone de faille St-Robert indiqué par le tracé des failles FS1 et FM1.

Ces anomalies sont surtout situées à l'intérieur du creux gravimétrique NE-SO longeant la zone de faille de St-Robert. Par exemple, les zones pédogéochimiques III, IV et V enrichies en Pb, Ag et Bi se situent au niveau du creux gravimétrique FG2. Ce couloir pourrait correspondre à une zone de cisaillement et de focalisation des fluides hydrothermaux (Fig. 6.54).

La carte suggère de plus l'importance des failles ou discontinuités NO-SE. Par exemple, à l'est de la rivière, le linéament gravimétrique FG5 est associé à des anomalies pédogéochimiques en Mo (X) et en W-Mo lorsque ce dernier intersecte la zone de faille de St-Robert (VIII) (Fig. 6.54). Le secteur minéralisé central, qui est la zone la plus minéralisée de la propriété, est localisé au croisement de deux creux gravimétriques. Le premier orienté NE-SO correspond à la dépression associée à la faille de St-Robert et le second à une faille orientée NE-SO présumée à partir des anisotropies magnétique (FM2) et gravimétrique (FG3). L'intersection entre le linéament gravimétrique FG3 et la zone de faille de St-Robert coïncide avec la seule zone anomaux en or de la propriété (VI). Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédant, les forages réalisés par la compagnie St-Robert Metals dans les années 1950 ont rapporté d'importantes concentrations en or.

Enfin, en regroupant l'ensemble de ces observations, nous pouvons également noter que les failles FS2 et FM3 passent dans le couloir de **haut gravimétrique AB4** d'orientation NNO-SSE d'environ 250 mètres de largeur. De plus, **les anomalies EM-TBF V50 et magnétique M8d** se situent également dans ce couloir et présentent une orientation distincte de la plupart des autres anomalies, indiquant possiblement un contrôle structural et la présence de matériaux électriquement conducteurs et magnétiques (Fig. 6.51 et 6.52). La combinaison des hautes valeurs gravimétriques, de hautes valeurs magnétiques et de conducteurs EM-TBF suggèrent la présence de minéralisations denses au sein de ce corridor. Les forages réalisés sur cette zone ont montré de très bonnes valeurs en bismuth et en WO_3 . Par exemple, sur sept analyses, le sondage N9 a décelé une moyenne de 0,51% de WO_3 avec un maximum de 1,26%. De même, la totalité de ces forages contient au moins une analyse en Bi avoisinant les 0,2%. Au point de vue lithologique, ces forages interceptent de nombreuses veines de quartz minéralisées en scheelite, galène, cosalite et parfois molybdénite ainsi que de nombreux porphyres minéralisés en scheelite.

Ces forages sont d'ailleurs situés dans la zone pédogéochimique **VII** enrichie en molybdène et bismuth (Fig. 6.54). D'après l'ensemble de ces observations, il serait opportun d'étudier cette zone plus attentivement.

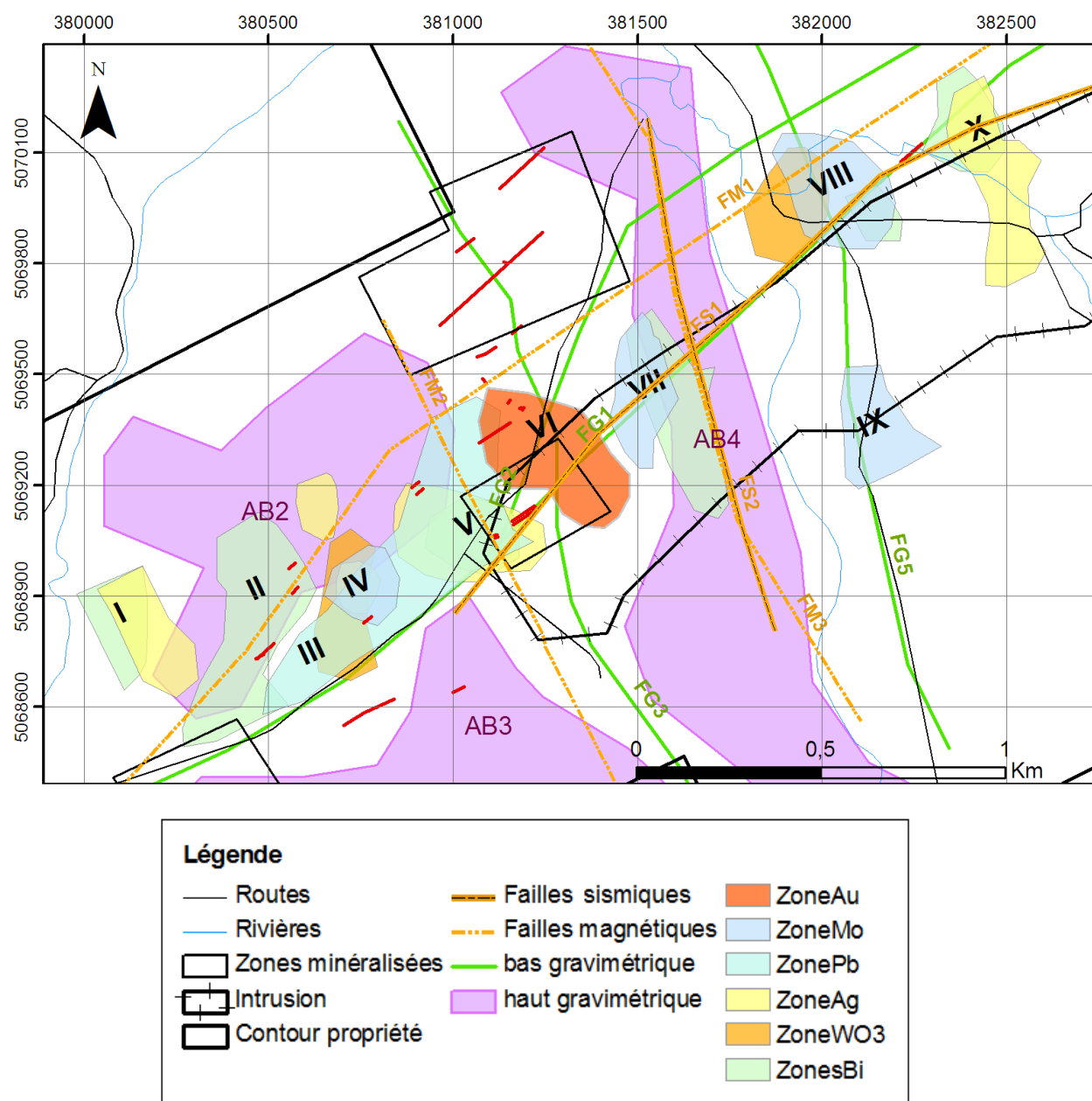


Figure 6.54 : Carte de compilation des zones d'intérêt pédogéochimique avec les « creux » et les « hauts » de la carte de dérivée verticale première de l'anomalie de Bouguer.

6.2.2 Levé audiomagnétotellurique

Dans le cadre des nouveaux travaux d'exploration réalisés pour Mines JAG Ltée, un levé audiomagnétotellurique a été réalisé et complété à l'hiver 2012. Ce levé a été planifié dans le but de documenter la position et la nature de la faille de St-Robert ainsi que celle de la masse intrusive responsable de la formation de l'anomalie magnétique régionale.

De par la nature relativement résistive des roches appalachiennes dans ce secteur ce levé devait pouvoir étudier le substrat rocheux jusqu'à une profondeur de l'ordre de 1500 mètres.

6.2.2.1 Principe

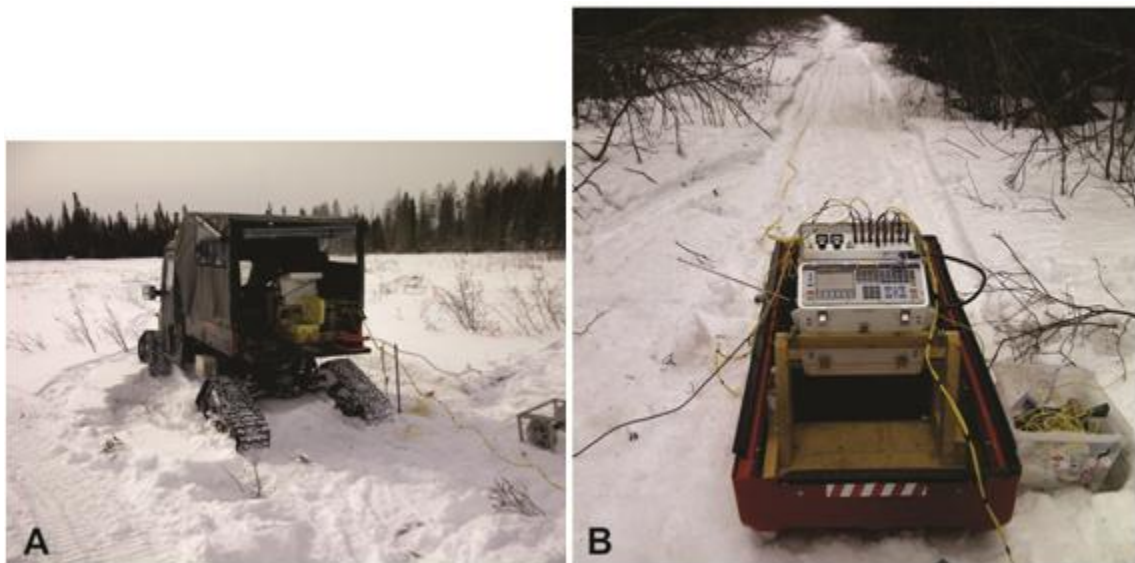


Figure 6.55 : Dispositif AMT (NSAMT) utilisé sur la propriété St-Robert. A- Chenillette avec équipements à bord et B-équipements dans un toboggan.

La méthode magnétotellurique (MT) a été développée dans les années 1950 parallèlement par Tikhonov (1950) et Cagniard (1953). Il s'agit d'une méthode géophysique électromagnétique passive qui permet d'obtenir des informations sur la distribution des conductivités électriques des roches, depuis la surface jusqu'à des dizaines de kilomètres (voire jusqu'à 150 km selon certaines études ayant porté sur la lithosphère). Cette méthode est employée pour la prospection pétrolière, minière, géothermique et hydrogéologique. La méthode est basée sur les rapports entre les champs électrique et magnétique terrestres dont les sources principales sont les fluctuations naturelles du champ magnétique terrestre s'étalant sur un large spectre de fréquences.

L'énergie électromagnétique naturelle provient de deux sources principales :

- Les vents solaires qui induisent des courants de particules chargées dans l'ionosphère. La fréquence du signal est comprise entre 0,001 Hz et 1 Hz. C'est cette gamme de fréquences qui est utilisée en MT classique.
- L'activité orageuse lointaine dont la fréquence est comprise entre 1 Hz et 20 Hz. Cette gamme de fréquences est utilisée en audiomagnétotellurique (AMT).

La variation temporelle du champ magnétique terrestre induit des courants électriques dans les roches terrestres naturellement conductrices, appelés courants telluriques. Les variations de ces derniers engendrent à leur tour un autre champ magnétique, appelé champ magnétique secondaire.

Le principe général des méthodes MT consiste à mesurer simultanément les variations temporelles du champ magnétique et du champ électrique. Si on considère une onde plane dans le plan horizontal (x-y), la résistivité électrique apparente est donnée par (Cagniard, 1953) :

$$\rho_a = \frac{|Z| \omega^2}{\omega \mu_0}$$

Où, ω est la fréquence angulaire, μ_0 est la susceptibilité magnétique. $Z(\omega)$ est l'impédance définie comme le rapport des modules des transformées de Fourier des composantes orthogonales des champs électrique et magnétique :

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}$$

Pour un milieu stratifié horizontalement dans lequel la résistivité varie avec la profondeur, la formule précédente permet de calculer une résistivité électrique apparente pour différentes fréquences. De manière générale, le traitement complet des données MT consiste à calculer le tenseur d'impédance (Z), constitué de quatre nombres complexes et qui relie les composantes des champs électrique (E) et magnétique (H) pour une fréquence angulaire donnée :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

Dans ce cas, la résistivité électrique apparente se calcule comme suit :

$$\rho_{xy} = \frac{Z_{xy}(\omega)^2}{\omega \mu_0} \text{ et } \rho_{yx} = \frac{Z_{yx}(\omega)^2}{\omega \mu_0}$$

le tenseur contient toutes les informations nécessaires à l'interprétation en une, deux ou trois dimensions, consistant à déterminer la distribution en profondeur de la résistivité électrique.

La profondeur de pénétration (z) augmente lorsque la fréquence f diminue :

$$z = 356 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}$$

Où z est la profondeur de pénétration en mètres, ρ_a la résistivité apparente en Ohm.m et f la fréquence en hertz. La profondeur d'investigation n'est pas égale à la profondeur de pénétration mais constitue dans les cas simples, une bonne approximation.

Les résultats des levés MT se présentent habituellement sous forme de résistivité apparente et de phase, définies à partir de l'impédance.

La phase ϕ_{xy} de l'impédance (en m.rad) décrit le déphasage entre le champ électrique et magnétique :

$$\phi_{xy} = \text{Phase } Z_{xy} = 1000 \cdot \arctan \frac{\text{imag}(Z_{xy})}{\text{real}(Z_{xy})}$$

La phase de l'impédance est reliée au changement de la résistivité apparente en fonction de la fréquence :

$$\phi = 1000 \frac{\pi}{4} \left(1 + \frac{d \log(\rho)}{d \log(f)} \right)$$

Dans le cas présent, les paramètres du tenseur d'impédance ont été calculés à l'aide de l'algorithme NSSKEW développé par Zonge. Les données sont produites sous forme de fichiers .csv.

6.2.2.2 Méthodes

L'appareil d'acquisition utilisé pour le levé est un récepteur Zonge GDP-32/II portable à usage multiple de 16 bits, comportant 10 canaux et contrôlé par un microprocesseur (Fig. 6.55, 6.56 et 6.57). Il a été utilisé en association avec un conditionneur de signal SC-8 externe, utilisé en mode de gain, qui sert à réguler l'amplitude du signal.

Puisque le sol était gelé lors du levé, des électrodes composées d'acier inoxydable, plutôt que de céramique poreuse Cu-CuSO_4 , ont été utilisées pour mesurer le champ électrique. Les électrodes étaient branchées au récepteur à l'aide d'un fil électrique de 14 brins.

Les mesures du champ magnétique ont été effectuées à l'aide d'un récepteur magnétique (antenne) Zonge ANT/6 (numéro de série : 1876). Un appareil GPS Garmin 62CS a été utilisé pour la localisation des stations de mesure.

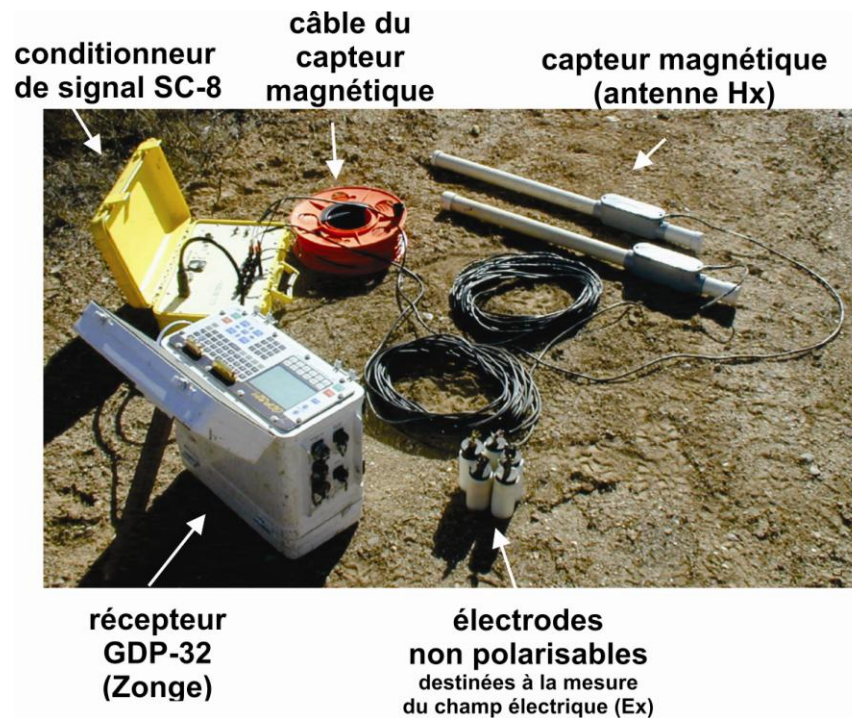


Figure 6.56 : Instruments utilisés pour le levé AMT.

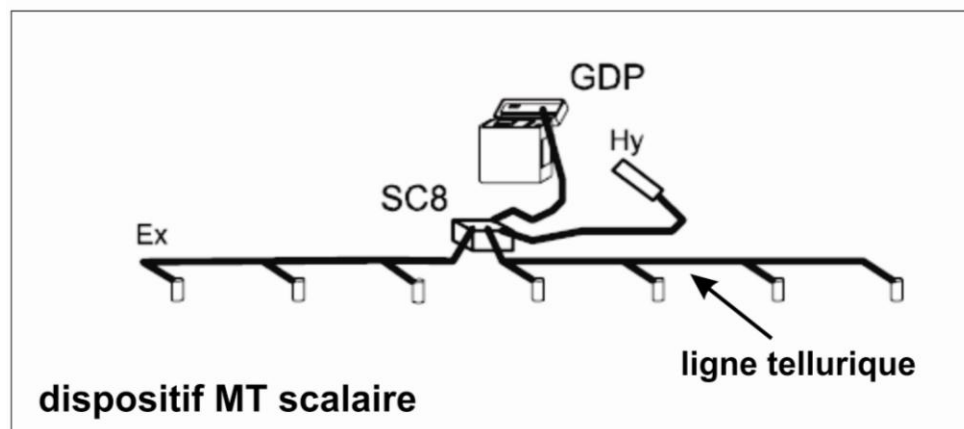


Figure 6.57 : Schéma du dispositif du levé AMT.

Le dispositif utilisé pour chacune des deux sections réalisées dans le cadre de ce levé comportait deux lignes telluriques d'une longueur de 200 mètres chacune, disposées de part et d'autre du récepteur GDP32/II (Fig. 6.58).

Quatre groupes d'électrodes de 1,5 mètre de longueur en acier inoxydable, réparties à des intervalles réguliers de 50 mètres, ont été reliées entre elles par chaque ligne tellurique. De la même façon, un groupe d'électrodes a été implanté près de la base. Les électrodes ont été enfoncées dans le sol gelé sur une profondeur d'environ 50 centimètres. Notez que les électrodes d'une station sont branchées entre elles et qu'un câble électrique est ensuite branché au récepteur GDP32/II.

Étant donné que l'environnement (sol gelé) s'est avéré localement très résistif, un groupe d'électrodes comptant de 1 à 10 tiges d'acier inoxydable (plutôt que des électrodes isolées) a été installé à chaque intervalle de 50 mètres. Ainsi, les mesures ont été effectuées en série à l'aide de neuf groupes d'électrodes installées à la fois (9 E), le récepteur magnétique (H) étant situé au milieu de la séquence d'acquisition. Le récepteur magnétique était orienté perpendiculairement à la ligne tellurique (Fig. 6.58). Chaque séquence de mesures s'étale ainsi sur 400 mètres de longueur. Les positions de chaque groupe d'électrodes et du récepteur ont toutes été localisées à l'aide d'un appareil GPS Garmin 62CS.

Une fois le dispositif installé, on procède à l'acquisition des données AMT pour trois bandes de fréquences, élevées (384 à 8192 Hz), intermédiaires (48 à 1024 Hz) et basses (3 à 64 Hz). L'acquisition des données dure 45 minutes. Puis, le dispositif est déplacé 400 m plus loin, le long de la section, de façon à ce que le premier groupe d'électrodes du dispositif soit situé à l'endroit même où était placé le dernier groupe d'électrodes du dispositif précédent.

Rappelons que la méthode AMT repose sur la mesure de l'impédance (Z), c.-à-d. le ratio champ électrique/champ magnétique (ou $Z = E/H$). Les valeurs du champ électrique sont obtenues en mesurant la différence de potentiel entre les extrémités des électrodes enfoncées dans le sol et en divisant cette valeur par la longueur du dipôle. Le champ magnétique est mesuré à l'aide d'un récepteur magnétique. Avant d'être enregistrés par le récepteur Zonge GDP32/II, les signaux électriques sont amplifiés par un conditionneur de signal Zonge SC8. Le processus est semblable à la conversion d'un signal analogue en signal digital.

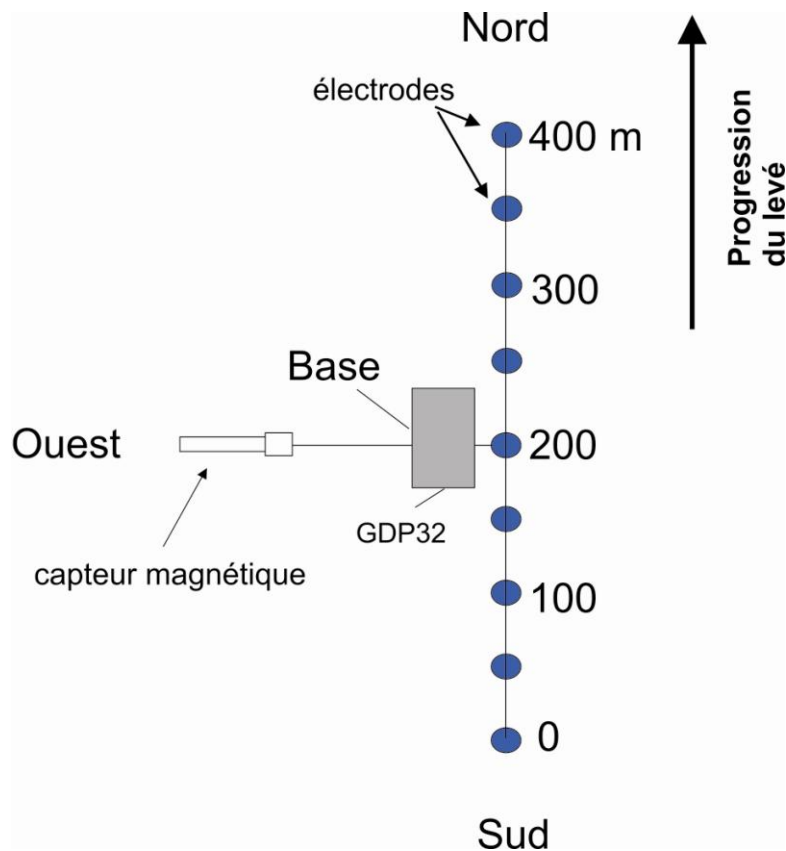


Figure 6.58 : Représentation schématique du dispositif utilisé pour le levé AMT 2012 sur la propriété St-Robert.

6.2.2.3 Résultats

Les données audiomagnétotelluriques ont été acquises le long de deux lignes totalisant une longueur de 4,8 km (96 stations de mesure). Ces lignes recoupent la masse intrusive (anomalie magnétique centrale de la propriété) selon un axe NE-SO grossièrement perpendiculaire au grain tectonique local (Fig. 6.59). La section 1 passe le long du chemin bordant le côté est de la rivière du Loup. La section 2 passe du côté ouest de la rivière et passe à proximité de la zone minéralisée Nord et du tunnel Lee.

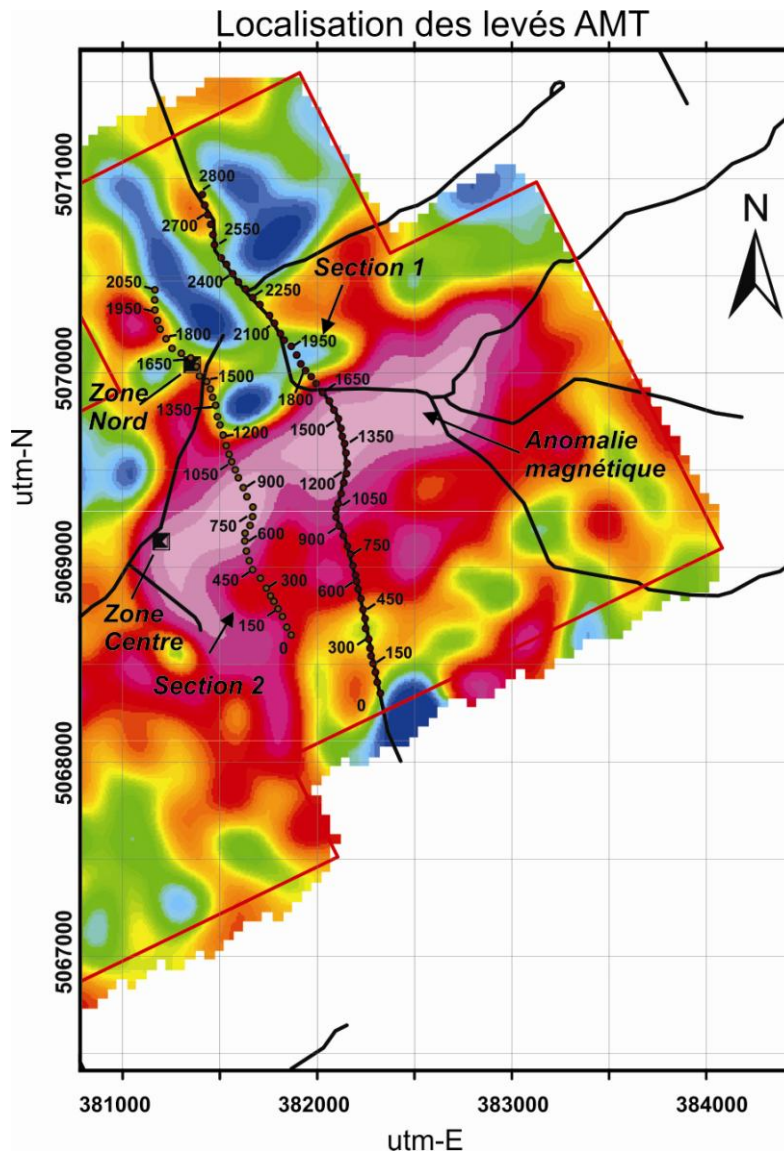


Figure 6.59 : Carte de localisation des stations de mesure du levé audiomagnétotellurique. Un fond représentant le champ magnétique total (filtré) a été ajouté pour localiser la masse intrusive.

Les données de résistivité électrique de la section 1 montrent une variabilité de plusieurs ordres de magnitude (Fig. 6.60). Dans l'ensemble, les données deviennent de plus en plus résistives avec l'accroissement de la profondeur et à plus de 800 mètres de profondeur, les roches deviennent systématiquement très résistives. Les données de résistivité électrique indiquent la présence d'une unité géoélectrique hétérogène peu profonde (II et III) délimitée par une discontinuité (I) qui pourrait souligner la présence d'un plan de décollement. Dans le cas présent, l'unité géoélectrique II correspond à des zones gréseuses et localement à la masse intrusive de St-Robert. L'unité III correspond probablement à des unités dominées par la présence de shales et mudstones (roches électriquement plus conductrices).

L'épaisseur de l'unité de roches présente au-dessus de la discontinuité (I) varie considérablement le long de la section. À l'extrémité sud-est, l'épaisseur est de 170 mètres et au nord de la faille de St-Robert l'épaisseur de l'unité atteint plus de 500 mètres.

Projet St-Robert

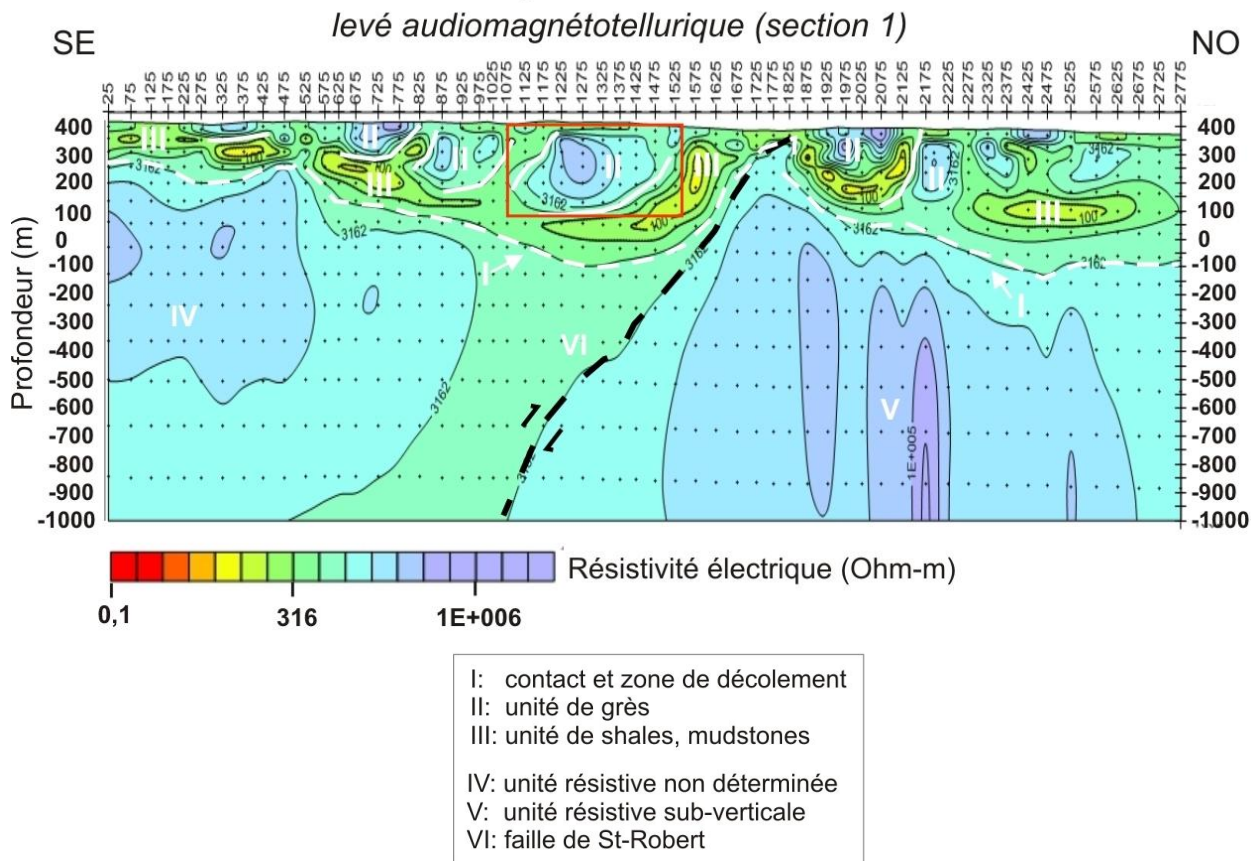


Figure 6.60 : Section 1 - Modèle d'inversion de la résistivité électrique apparente en 2D, corrigé pour les effets statiques.

De plus, cette section permet de bien visualiser en profondeur la position et le pendage de la faille de St-Robert (VI). Cette dernière pente clairement vers le sud-est et l'entraînement des unités de roches sédimentaires vers le plan de faille suggère un mouvement normal associé à un effondrement du bloc sud-est.

Enfin, au niveau de la masse intrusive liée à l'anomalie magnétique de St-Robert (position indiquée par un cadre rouge sur la section), nous pouvons observer que cette intrusion correspond à une masse de roches très résistives recouvertes d'une centaine de mètres de matériaux rocheux et quaternaires moins résistifs. La présence de cette masse intrusive à environ 150 mètres de profondeur est compatible avec l'estimation de profondeur basée sur la méthode d'Euler (données magnétiques).

D'après cette section, la masse intrusive ferait environ 400 mètres de largeur pour une épaisseur de l'ordre de 240 mètres. Cette masse est délimitée vers le bas par une faille passant au contact des roches intrusives et des shales. Notez qu'un forage pourrait être implanté afin de vérifier la présence potentielle de minéralisations de type porphyriques dans ce secteur.

Les roches présentes en profondeur sous l'interface I sont caractérisées par de très fortes valeurs de résistivité électrique. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que les valeurs normalement observées dans les roches sédimentaires appalachiennes. Du côté sud de la faille de St-Robert, les données sont relativement homogènes (IV) ce qui pourrait s'expliquer par la présence de corps intrusifs. À l'opposé, les roches associées au domaine V sont caractérisées par une forte anisotropie verticale. Ces roches pourraient correspondre à un socle précambrien semblable à celui de Chain Lake.

En l'absence de forages profonds, l'interprétation de la géologie à plus de 800 mètres de profondeur demeure spéculative. Toutefois, en regroupant les données AMT et les données gravimétriques nous pouvons suggérer une interprétation valable. Ainsi, dans un modèle de couverture de roches appalachiennes recouvrant le socle précambrien, la diminution des valeurs de l'anomalie de Bouguer du sud vers le nord s'expliquerait par un épaissement de la couverture de roches sédimentaires vers le nord. Ceci est compatible avec l'épaississement de 330 mètres observé du sud vers le nord sur une distance horizontale de seulement 2,6 kilomètres. Quoique la présence de roches volcaniques ophiolitiques pourrait expliquer la signature résistive du domaine V, ces roches denses et magnétiques seraient associées à des rehaussements des anomalies de Bouguer (gravimétrie) et magnétiques (champ total). Ces rehaussements ne sont pas observés dans les secteurs de Saint-Robert Bellarmin et de Saint-Gédéon.

La section 2 dépeint plusieurs des caractéristiques de la section 1 et ce malgré une distance de 500 mètres les séparant (Fig. 6.61). La section 2 est toutefois plus courte et documente peu la partie sud-est de la propriété St-Robert. L'alternance d'unités de grès (II) et de shales (III) située au-dessus de la discontinuité (I) est très évidente. Tout comme pour la section 1, la section 2 montre la présence de la masse intrusive de St-Robert indiquée par une anomalie résistive située dans l'encadré rouge. La section souligne également que la base de l'intrusion est recoupée par une structure conductrice de plus de 700 mètres de longueur et d'une épaisseur d'environ 50 mètres (VII). Cette structure pourrait être à l'origine des anomalies de polarisation provoquée PP3, PP4, PP6, IP5, IP6, IP7 et IP8 et de l'anomalie magnétique M10.

Étant donné que ce secteur est très minéralisé en métaux, Ag et W, il serait possible qu'une partie de cette masse soit minéralisée en sulfures semi-massifs.

Le domaine de roches très résistives (V) situé au nord de la faille de St-Robert révèle également une forte anisotropie verticale qui semble être caractéristique du sous-bassement rocheux.

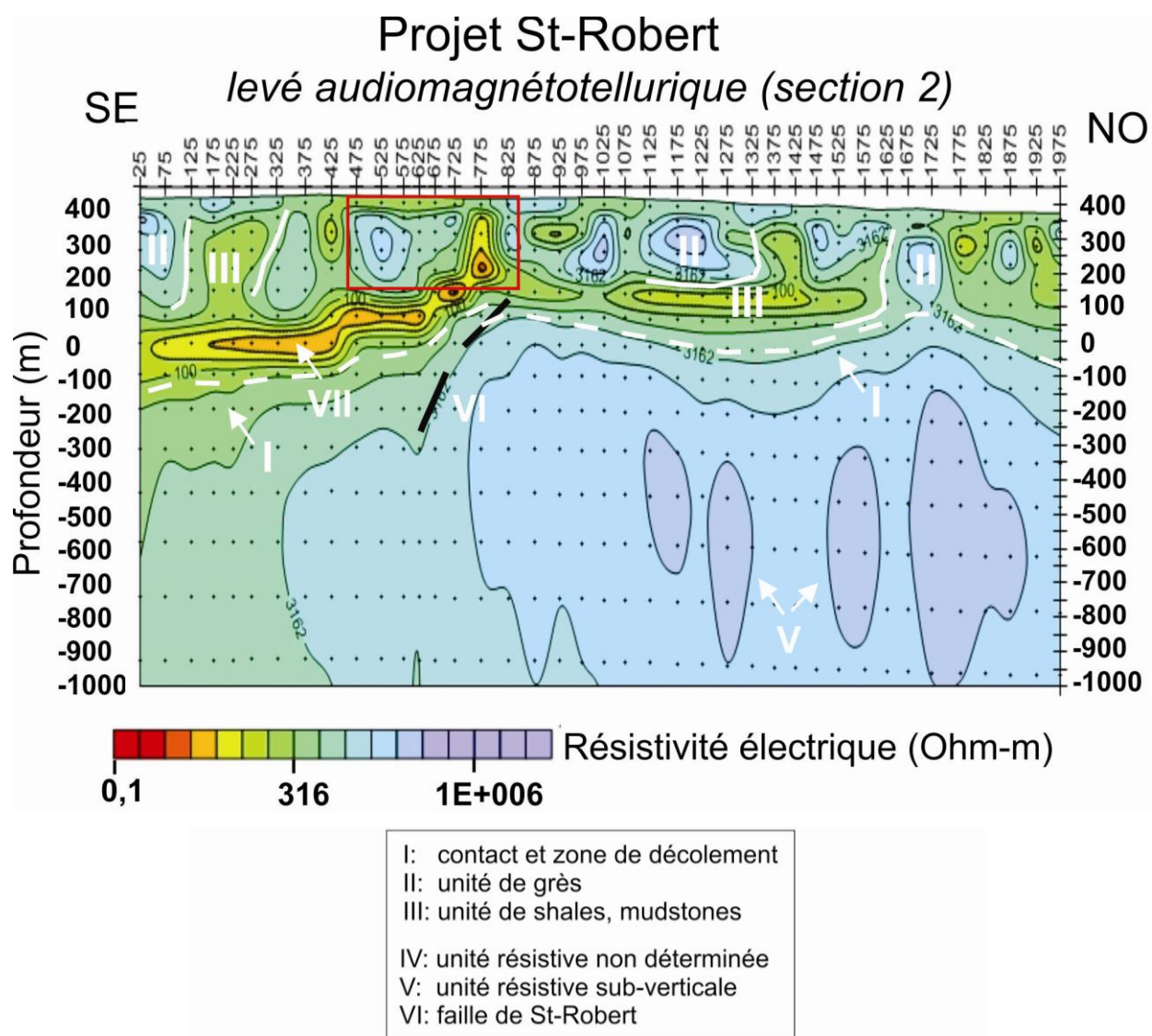


Figure 6.61 : Section 2 - Modèle d'inversion de la résistivité électrique apparente en 2D, corrigé pour les effets statiques.

Pour une meilleure compréhension, l'ensemble des observations réalisées est récapitulé dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4 : Récapitulation des observations réalisées sur la géophysique de la propriété St-Robert.

Anomalies mag	PP (Phoenix)	PP (Gaucher)	VLF	Gravi	F-Sism	F-Mag	Pédo	Géologie	Importance
M3		PP6	V5 + V6	AB3				dykes - zone Sud	+
M4 + M7			V37 + V38	AB2			I	oxydation des roches intrusives + veines de qz (gn, sch ± mo)	++
M5			V47					pyritisation importante au nord	-
M8b			V10					Intrusion sous-jacente	+
M8c			V3					Chemin de la mine ?	-
M8d				FG3				orientations distinctes	++
M9a			V12					?	+
M10	IP8		V8 + V48				IX	bonnes valeurs en Ag + failles	++
M11			V27 + V 40					?	+
M13			V 29 + V 45					intense pyritisation	-
	IP4	PP1						veines de quartz	+
		PP2	V4					Proche du chemin de la mine	-
		PP3				FM3		?	+
		PP5 + PP9 + PP15	V4	FG1	FS1			Bord de l'intrusion	+
		PP4 à PP15						Mort-terrain épais	
	IP7		V32					Contact intrusion-roches	++
			V26	AB2		FM1	II	veines de quartz	+
			V50	AB4	FS2	FM3		orientations distinctes	++
			V41		FS1		X	proche d'une veine de qz (gn, sch, py)	++
			V32				IX	Bord de l'intrusion	+
			V31	FG1		FM1		?	+
				AB4	FS2	FM3	VII	très bonnes valeurs en Bi	++

6.3 Discussion des données géophysiques

Dans cette partie, nous allons discuter des principaux résultats des levés géophysiques et les corrélés avec la géophysique et la géologie régionale.

Au niveau régional et local, nous pouvons observer deux types de faille :

- des failles d'orientation NE-SO parallèles au grain structural des Appalaches telles que les failles de la rivière Victoria et de Woburn, ou encore les failles FM1 et FS1 de la propriété de St-Robert (Fig. 6.48);
- des failles d'orientation NNO-SSE, perpendiculaires au grain structural des Appalaches. Ces failles sont moins marquées et aussi moins documentées dans la région. Sur la propriété de St-Robert, les failles FS2, FM2 et FM3 correspondent à ce type de structures.

L'allongement NE-SO de l'intrusion de St-Robert suggère un contrôle tectonique lors de la mise en place de cette intrusion. De même, l'intrusion de St-Sébastien-Ste-Cécile montre un allongement quasi parallèle au grain structural des Appalaches du sud du Québec. L'âge du pluton St-Sébastien-Ste-Cécile étant de 374 ± 1 Ma (Simonetti et Doig, 1990), nous pouvons émettre l'hypothèse que les failles régionales, les failles NE-SO présentent sur la propriété St-Robert ainsi que l'intrusif sous-jacent se seraient mis en place au Dévonien tardif, entre le Frasnien et le Famennien.

La différence entre les valeurs de l'anomalie de Bouguer complète du nord et du sud de la propriété pourrait être expliquée par une hétérogénéité du domaine de très hautes valeurs de résistivité électrique que nous observons sur les profils de résistivité du levé d'audiomagnétotellurique (Fig. 6.60 et 6.61). En effet, nous avons pu remarquer que ces deux domaines se situent de part et d'autre des failles FM1 et FS1.

La figure 6.62 montre les valeurs régionales de l'anomalie de Bouguer. Nous pouvons noter que les contrastes gravimétriques observés sur la propriété sont également présents au niveau régional avec la présence d'une dépression gravimétrique d'environ 30 kilomètres de diamètre centrée entre St-Robert Bellarmin et St-George. Cette dernière fait partie d'un vaste domaine qui s'étend sur 160 kilomètres en suivant la frontière Québec-Maine le long du Synclinorium de Connecticut Valley -Gaspé.

La signature circulaire englobe également la région de l'intrusion St-Sébastien-Ste-Cécile ce qui pourrait éventuellement expliquer son lien temporel avec l'intrusion de St-Robert. Notez que l'intrusion du lac aux Araignées présente également la même signature gravimétrique et est datée de $383 \pm 3\text{Ma}$ (Simonetti et Doig, 1990).

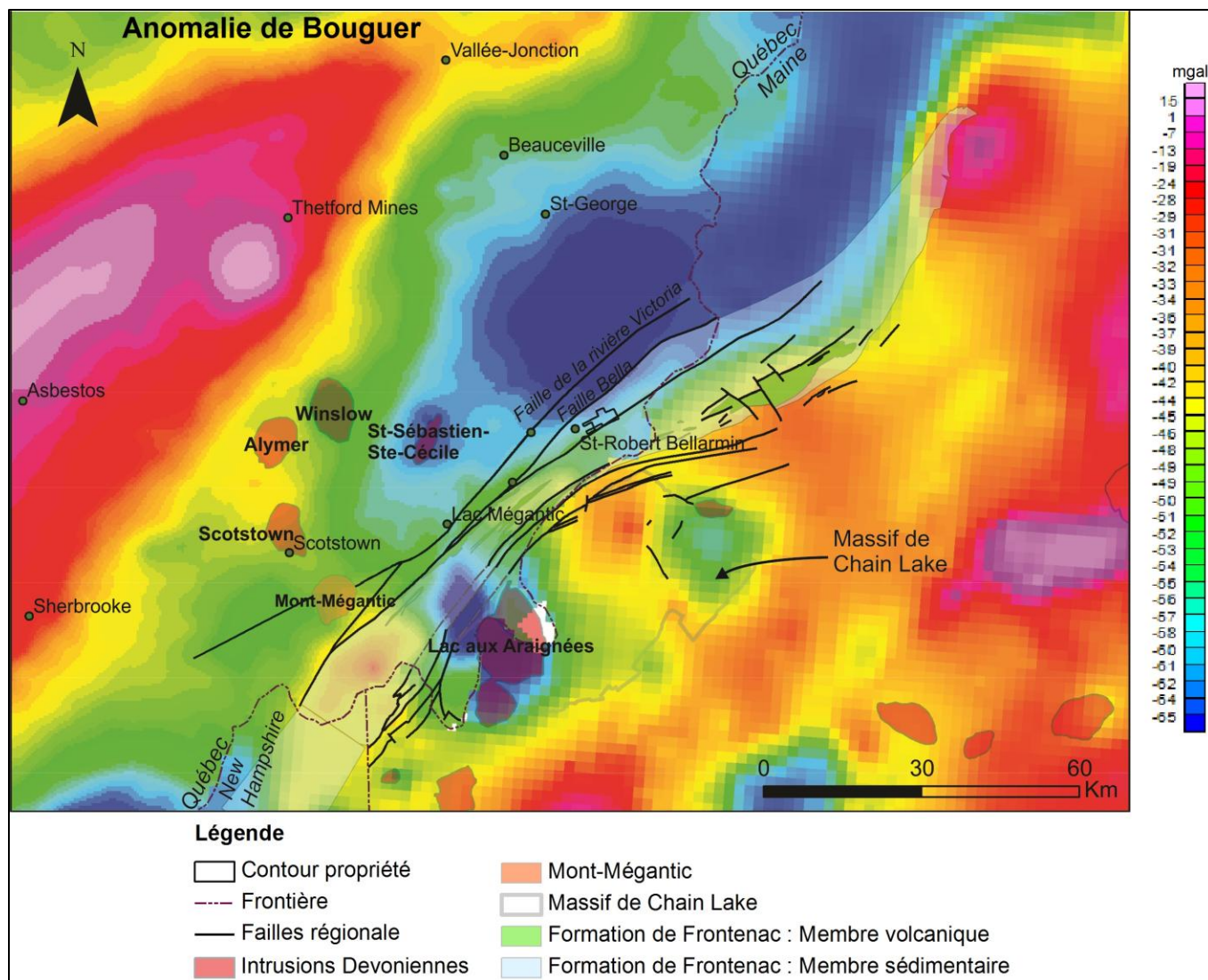


Figure 6.62 : Compilation de la géologie simplifiée de la région et des cartes d'anomalies de Bouguer du Québec (<http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/produits-services/entrepot-donnees-geoscientifiques/11819>) et du Maine (http://pubs.usgs.gov/of/2004/1258/HTML/NE_data.htm).

Au niveau régional, nous pouvons remarquer sur la figure 6.63 que la majorité des intrusions dévoniennes du nord du Maine et du New Hampshire présente une signature gravimétrique avec de faibles anomalies de Bouguer. De même, au niveau du Massif de Chain Lake, les faibles anomalies de Bouguer correspondent à des intrusifs ordoviciens ou dévoniens (granite, granodiorite et monzonite à quartz). Nous pouvons donc supposer que le domaine observé au nord de la propriété St-Robert pourrait indiquer la présence d'une ou plusieurs larges intrusions felsiques sous-jacentes.

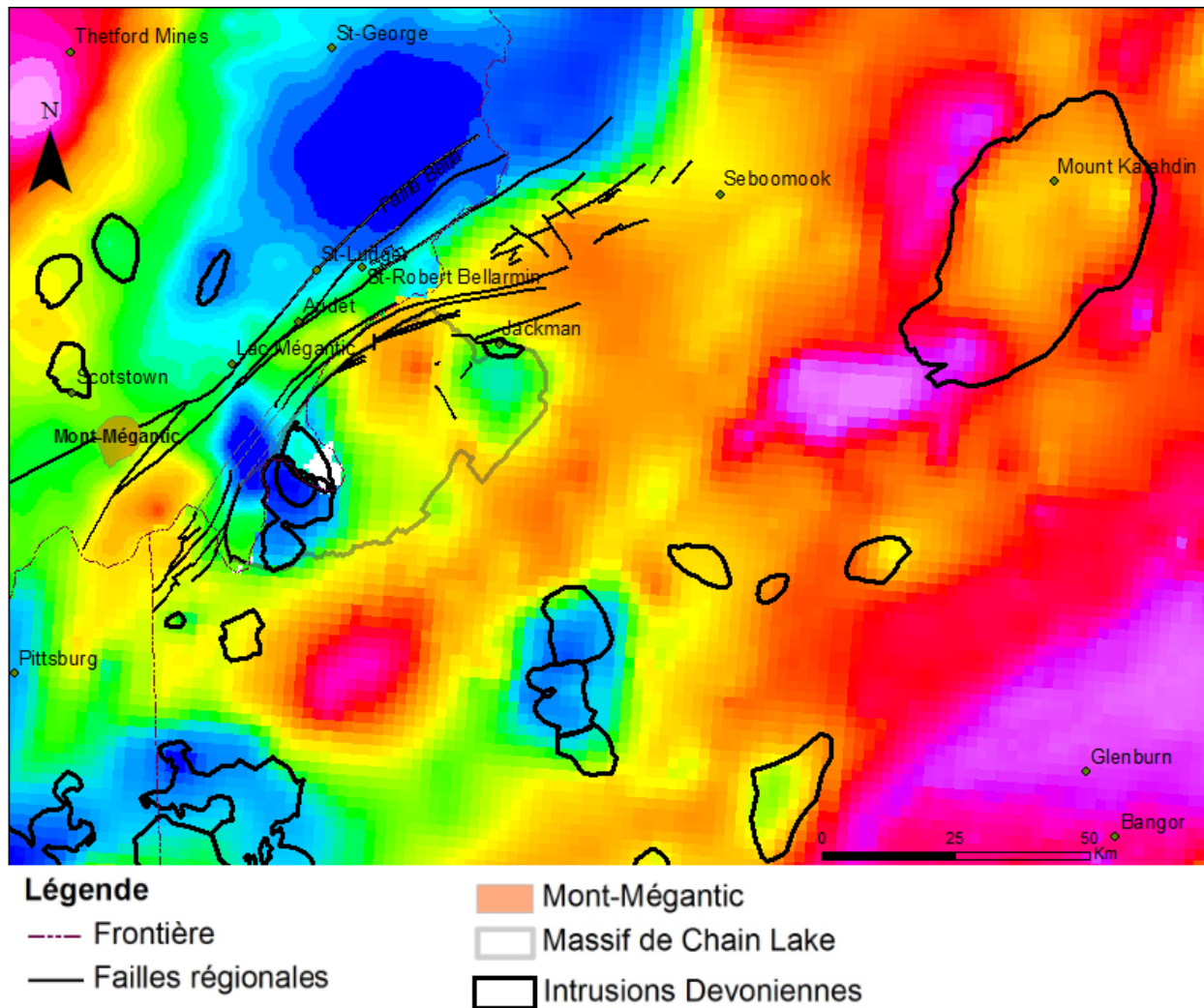


Figure 6.63 : Carte de la variabilité de l'anomalie de Bouguer du nord du Maine et du New Hampshire (http://pubs.usgs.gov/of/2004/1258/HTML/NE_data.htm) et du sud du Québec (<http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/produits-services/entrepot-donnees-geoscientifiques/11819>).

En revanche, les levés magnétiques régionaux n'ont pas été capables de repérer ce domaine. De ce fait, il ne doit pas être magnétique. Notez que mis à part les plutons de St-Sébastien-Ste-Cécile et du lac Mégantic, aucune des intrusions ne présente de signatures magnétiques particulières (Fig. 6.64).

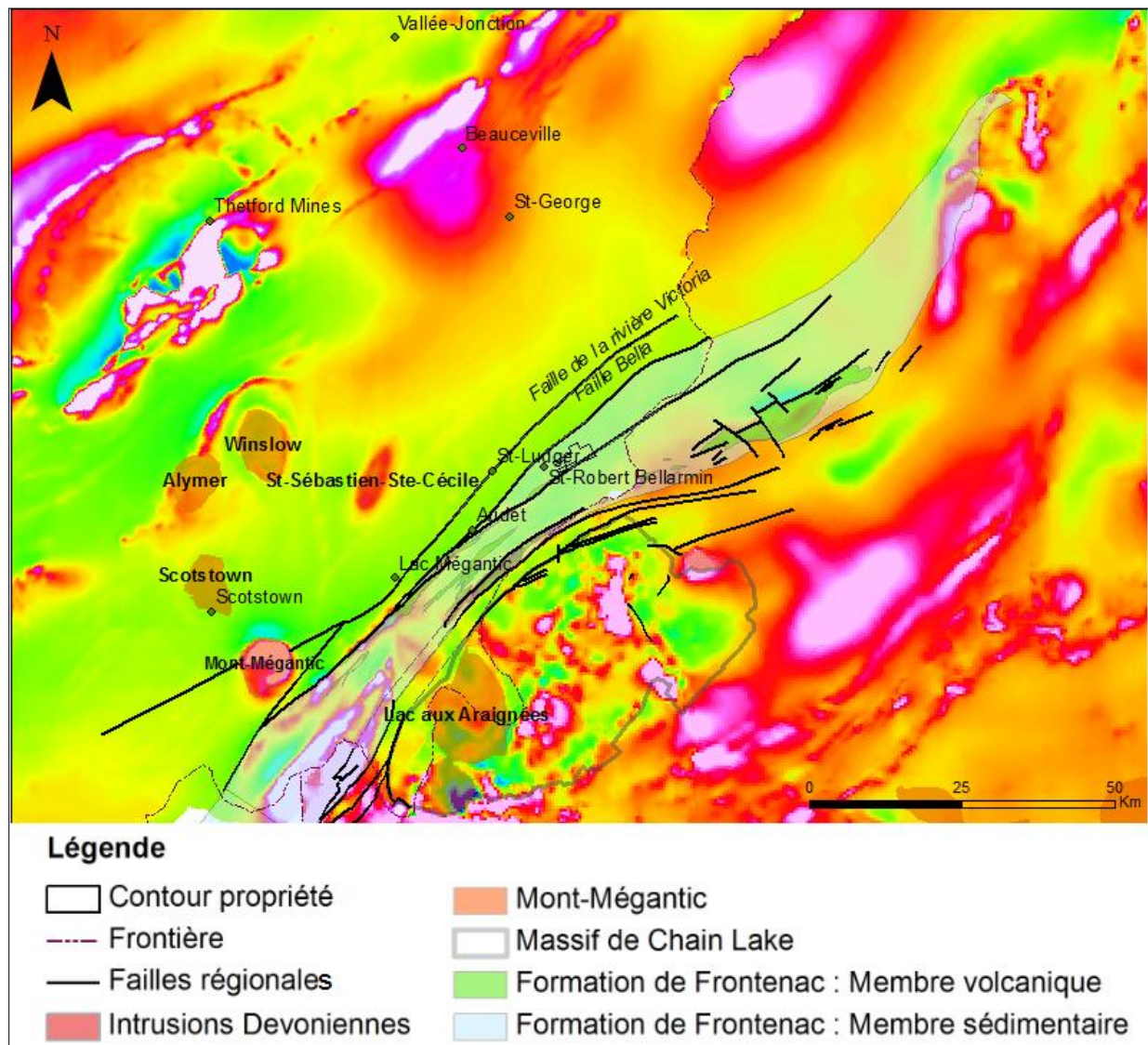


Figure 6.64 : Carte montrant la variabilité du champ magnétique total dans le sud du Québec (<http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/produits-services/entrepot-donnees-geoscientifiques/11819>) et le nord du Maine (http://pubs.usgs.gov/of/2004/1258/HTML/NE_data.htm).

De 1983 à 1984, la USGC et Ressources Naturelles Canada ont mené une série de levé sismique afin de contraindre la structure des Appalaches. Le levé GM 2001 part du St-Laurent jusqu'au massif de Chain Lakes (Fig. 6.65).

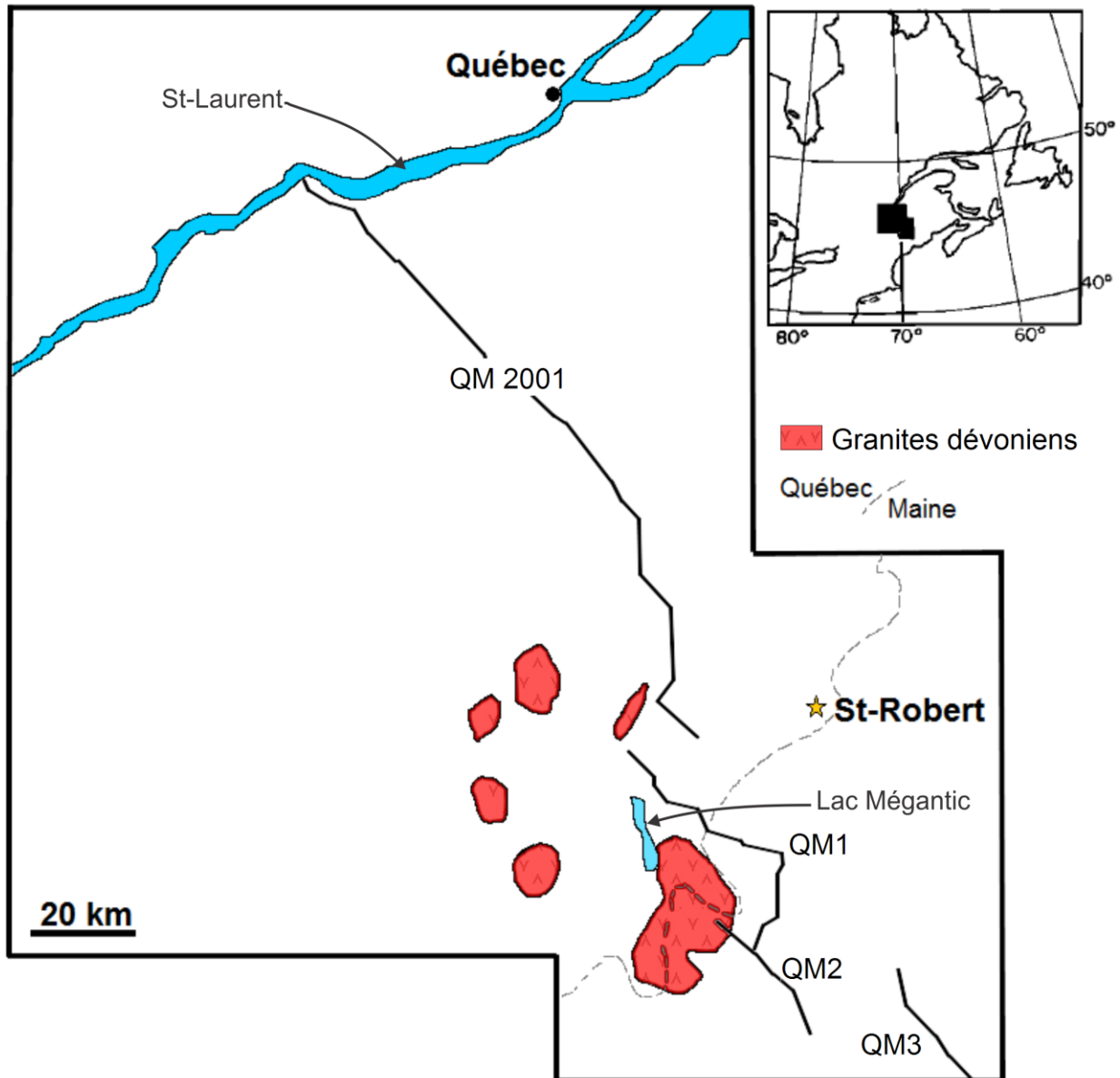


Figure 6.65 : Localisation des profils sismiques effectués par l'USGC et Ressources Naturelles Canada. Modifié de Spencer et al. (1989).

La figure 6.66 montre la coupe géologique des Appalaches du sud du Québec interprétée d'après les données sismiques des lignes GM 2001, GM1 et GM2. Notez que ces sections sont situées à plus de 40 kilomètres à l'ouest de Saint-Robert Bellarmin.

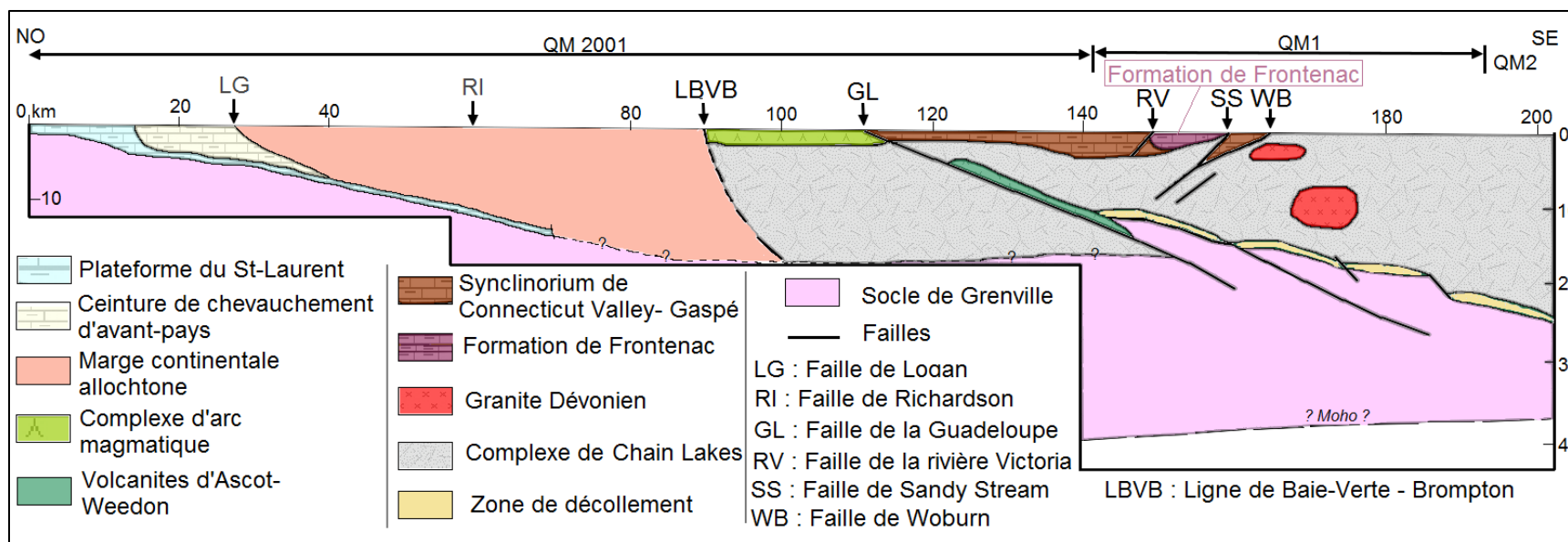


Figure 6.66 : Coupe géologique issue de l'interprétation des profils sismiques effectués par l'USGS et Ressources Naturelles Canada. La localisation du profil est située figure 6.65. Modifiée de Spencer et al. (1989).

Tout d'abord, nous pouvons observer que les formations du SCVG et de Frontenac ne sont pas très épaisses. En effet, d'après le profil sismique (Fig. 6.66), il semblerait que ces unités fassent environ deux kilomètres d'épaisseur au maximum. Nous pouvons également noter que la Formation de Frontenac semble être contrôlée par les failles de Sandy Stream et de la rivière Victoria. Notez que cette formation est plus épaisse au nord-ouest qu'au sud-est et que cette différence d'épaisseur semble contrôlée par l'action des failles de Sandy Stream et de la rivière Victoria. Cette observation est en accord avec ce que nous avons remarqué sur les profils des levés audiomagnétotelluriques sur la propriété St-Robert.

De plus, un autre point important à remarquer est la présence du socle de Chain Lakes à seulement quelques kilomètres sous ces unités et s'étendant jusqu'à la Ligne de Baie-Verte Brompton. Notez également qu'une écaille de Grenville est présente à environ 10 kilomètres de profondeur sous la Formation de Frontenac certainement causée par l'action profonde de la faille de la Guadeloupe. Ces deux entités doivent donc avoir une signature gravimétrique importante.

Le profil sismique ne passe pas au-dessus de l'anomalie gravimétrique régionale indiquée sur la figure 6.62, mais compte tenu du contexte structural régional, nous pouvons soumettre une autre hypothèse concernant l'origine de l'anomalie gravimétrique : elle pourrait être causée par une écaille du socle de Grenville ou du complexe de Chain Lake. La présence de ces écaillles ou leurs superpositions entraîneraient une augmentation de la profondeur du Moho, créant donc une anomalie de Bouguer négative. La présence de cette écaille ne serait pas exceptionnelle puisque l'on en retrouve quelques-unes dans les Appalaches. Les complexes de Ste-Marguerite au Québec, de Long Range au Newfoundland, et de Blair River en Nouvelle-Écosse sont des exemples d'écaillles grenvilliennes visibles en surface.

CHAPITRE 7 : DISCUSSION

Ce chapitre comporte trois parties permettant de synthétiser les données et nos observations sur la géologie, la géochimie et la géophysique de la propriété St-Robert. La première partie consiste en une synthèse des principales observations réalisées lors de l'étude de la propriété, la seconde en une discussion sur le potentiel minéral de la propriété et la dernière en une intégration de l'ensemble des données historiques et récentes dans le but d'identifier de futures cibles de forage.

7.1 Synthèse des observations

7.1.1 Géologie générale

La propriété St-Robert est située dans la Formation volcano-sédimentaire siluro-dévonienne de Frontenac. Cette dernière est composée de deux séquences volcaniques représentées par les volcanites de la rivière Clinton au sud-ouest et par les volcanites et les gabbros de Frontenac-Chartierville au nord-est. Ces séquences forment une structure synclinale régionale (Chevé, 1990; Marleau, 1968). La sous-unité de Frontenac-Chartierville est plus jeune que celle de la rivière Clinton. Les roches sédimentaires que nous observons sur la propriété St-Robert se situent stratigraphiquement et temporellement au-dessus de ces deux unités volcaniques. Elles sont composées majoritairement de grès et de shales avec des unités de schistes graphiteux et de quartzite. Les grès présentent bien souvent une allure massive tandis que les shales sont largement affectés par une schistosité de crénulation de direction moyenne N50°. Cette dernière est parallèle au grain tectonique des Appalaches du sud du Québec, aux failles et aux plans axiaux des plis observés, indiquant que cette région des Appalaches a subi une contrainte orogénique très forte. Sur la propriété St-Robert, la foliation S1 n'est pas reprise par d'autres foliations ou clivages ce qui est compatible avec la nature post-taconienne de ces roches.

La Formation de Frontenac s'est probablement formée lors d'un épisode d'extension pendant l'orogénèse acadienne. Quoique n'étant pas l'objet premier de mémoire, nous suggérons que la Formation de Frontenac s'est mise en place dans une zone de transition entre la marge continentale du Laurentia et une lithosphère océanique variablement métasomatisée.

Ce contexte pourrait à la fois expliquer la présence de sédiments de dérivation continentale et celle de volcanites transitionnelles entre des MORB (Mid Ocean Ridge Basalts) et des OIB (Ocean Island Basalts).

Des dykes granodioritiques et rhyolitiques recoupent les roches sédimentaires de la propriété le long de plans de faiblesses (c.-à-d. faille, contact lithologique, foliation S1) et sont probablement affiliés à l'intrusif de St-Robert. L'élongation de l'intrusion parallèle au grain tectonique régional et la composition surtout granodioritique des nombreux dykes périphériques suggèrent que l'intrusion de St-Robert fait partie du groupe de plutons dévoniens observés dans le sud du Québec et dans le nord des états du Maine et du Vermont. Ces intrusions se seraient mises en place à la fin de l'orogénèse acadienne. Des dykes rhyolitiques et lamprophyriques sont également visibles au sein de la propriété et semblent être plus récents que les précédents.

7.1.2 Altérations - minéralisations

Les roches de la propriété St-Robert ont subi des altérations reliées à la transformation des plagioclases calciques en muscovite et phengite et à celle de la biotite en chlorite. Ces altérations se superposent à une altération potassique ayant créé des biotites et des feldspaths potassiques que l'on observe uniquement à quelques endroits sur la propriété. Compte tenu de la présence d'importantes failles sur la propriété, les roches sédimentaires ont de plus été affectées par une carbonatation secondaire d'intensité variable. En bordure des zones minéralisées, à une échelle submétrique, les épontes montrent en général un enrichissement systématique en K_2O (Rb, Ba), un faible enrichissement en MgO et un léger appauvrissement en CaO. Une altération météorique est également bien visible indiquant que l'action abrasive des glaciers n'a pas été très forte dans la région, ce qui est en accord avec la faible dispersion glaciaire que nous avons invoquée dans l'interprétation des données pédogéochimiques.

La minéralisation sur la propriété St-Robert est de type polymétallique et est contenue principalement dans des veines de quartz variant de quelques centimètres à un mètre et dans les roches sédimentaires encaissantes. Sur la propriété St-Robert, ces minéralisations se regroupent en trois principales zones (Sud, Centre et Nord). À la lumière des nouvelles interprétations et données géophysiques, les zones riches en sulfures seraient beaucoup plus nombreuses. Occasionnellement des minéralisations sont observées dans des dykes porphyriques. Le tunnel Lee est un bon exemple de ce type de minéralisation. À cet endroit, un dyke porphyrique montre une forte minéralisation en tungstène.

Dans l'ensemble, les minéralisations de la propriété St-Robert se sont mises en place vers la fin de l'orogénèse acadienne, dans les plans de faiblesses créés par des failles, des contacts lithologiques et des plans de schistosité.

La minéralisation se présente sous la forme de galène argentifère (PbS), pyrite (FeS₂), scheelite (CaWO₄), cosalite (Pb₂Bi₂S₅), bismuthinite (Bi₂S₃), sphalérite (ZnS) et molybdénite (MoS₂). On retrouve également des quantités accessoires de cadmium, de tellure et de platine en inclusions dans certaines phases sulfurées. La bismuthinite et la cosalite sont parfois argentifères.

Les minéralisations présentent une zonation au sein de la propriété St-Robert avec des minéraux de plus haute température dans les zones Centre et Nord (cosalite, scheelite, bismuthinite) et de plus basses températures dans la zone Sud (galène argentifère, pyrite). Cette zonation minérale suggère fortement que l'intrusion de St-Robert sous-jacente aux zones Centre et Nord a joué un rôle important dans la formation des minéralisations polymétalliques.

Les fluides minéralisateurs piégés dans des inclusions fluides avaient des températures variant entre 220 et 245 °C, contenaient des quantités variables de H₂O, CO₂, CH₄ et N₂, avaient un pH compris entre 3 et 5 pour une salinité faible (0 à 8 % poids de NaCl équivalent) (Cattalani, 1987). Le $\delta^{18}\text{O}$ de ces fluides est environ égal à 0 ‰ indiquant une source météorique. Des fluides post-minéralisations de faible salinité et contenant du Na et Ca en solution ont également été piégés dans les inclusions fluides et ont démontré des températures de piégeage comprises entre 140 et 210 °C (Cattalani, 1987).

7.1.3 Pédogéochimie

Les sols de la propriété de St-Robert se sont développés dans un climat continental tempéré à hivers froids et étés chauds, favorable à la formation de sols podzoliques. Bien que la dernière glaciation ayant affecté la région l'ait recouverte d'une importante épaisseur de tills glaciaires, les sols de la propriété de St-Robert se sont principalement développés sur un placage de till. Ce contexte, n'étant pas propice à une grande dispersion des particules minérales érodées du socle rocheux, est hautement favorable à l'utilisation de levés pédogéochimiques pour l'exploration.

Pour les minéralisations en Pb-Ag-Bi, W-Mo et Au, la géochimie des sols reflète bien la présence des principales zones minéralisées dans le roc et ce même si localement, la couverture de mort-terrain est importante.

De plus, les relations entre la géologie du socle rocheux et la géochimie des sols sont très importantes. En effet, nous avons pu noter que la plupart des zones d'intérêts se situent proche des principales anisotropies « sismiques » et « magnétiques » interprétées dans cette étude comme étant des failles. De ce fait, ces dernières devraient constituer de nouvelles cibles d'exploration pour la région.

Plusieurs nouvelles zones d'intérêts ont pu être mises au jour grâce aux résultats de ce levé. Dans la majorité des cas, peu de sondages et d'analyses ont été réalisés dans ces nouvelles zones. Pour les autres, les sondages montrent une bonne corrélation entre les valeurs pédogéochimiques et lithogéochimiques. Une zone de sols riches en Pb, Ag et Bi de près d'un kilomètre de long sur 250 mètres de large a été découverte dans la prolongation nord-est de la zone Sud. Aucun forage n'a été réalisé dans cette zone.

La pédogéochimie a également montré une corrélation positive entre les concentrations en bismuth et en argent. Ceci s'explique par l'observation, jusqu'ici non documentée, de la présence de cosalite et de bismuthinite argentifère dans la zone Nord.

La géochimie des sols nous montre également un net enrichissement en or dans la zone centre. De même, les analyses géochimiques réalisées sur les sédiments de ruisseau par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec dans la rivière du Loup située au pied du bassin versant de la zone Centre montrent un enrichissement en or significatif. Ces observations, indépendantes de celles de la St-Robert Metals, viendraient appuyer la présence d'or dans l'extension est de la zone Centre. Cette cible avait été visée par les forages de Mines JAG Ltée dans les années 1980. Malheureusement, en fonction de nos reconstitutions 3D des forages, il semble que la cible aurifère découverte par la St-Robert Metals aurait été ratée par les forages de Mines JAG Ltée. Notez que ces derniers ont probablement dévié dans la forte épaisseur de mort-terrain au sud de la zone de faille de St-Robert.

7.1.4 Géochimie des zones minéralisées

Les résultats de l'échantillonnage en rainure effectué lors de l'été 2011 montrent que les zones minéralisées Centre, Sud et Nord contiennent quelques bonnes valeurs en Pb, Zn, Ag, Bi, W et parfois en Mo malgré le fait que l'échantillonnage s'est fait principalement en surface des veines.

La zone Sud montre des teneurs importantes en Pb sur quasiment toutes les veines échantillonnées pouvant aller jusqu'à 9 % de Pb et quelques veinules sont également très riches en Pb, Bi, Zn, Ag et même en W avec un échantillon contenant 1 % de W. Globalement, pour l'instant nous ne pouvons conclure que les épontes de ces veines présentent un potentiel minéral significatif. Toutefois, des valeurs intéressantes sont localement observées (2,1 % de Pb). Des forages devraient être implantés de part et d'autre de ces veines pour évaluer le réel potentiel de cette zone minéralisée.

Dans la zone Centre, où l'on recherchait à évaluer le contenu en or, seulement quelques échantillons ont montré des concentrations en or supérieures à la limite de détection (max. de 270 ppb). Toutefois, les résultats suggèrent un gradient d'enrichissement en or vers l'est qui serait compatible avec la présence d'or détectée dans les anciens forages et aussi avec les résultats du levé pédogéochimique.

À l'aide du logiciel Target de Geosoft, nous avons pu observer que les zones riches en or, interceptées par les sondages de St-Robert Metals dans les années 1950, n'ont jamais été réinterceptées par la suite. De ce fait, il est très probable que cette zone riche en or existe bel et bien.

La zone Centre présente également de bonnes concentrations en Pb et W (2,5 % de W sur un échantillon) ainsi que parfois en Ag et Bi où on a pu observer un échantillon contenant 1,3 % de Bi.

La veine 22 de la zone Nord n'a pas décelé de teneurs importantes en métaux mais la veine 24 semble riche en Bi, Pb, Ag, W et contient même de bonnes teneurs en or avec un échantillon à 0,3 g/t d'Au. Le bismuth est présent en quantité économique dans cette veine avec des valeurs allant jusqu'à 0,8 %. Les nombreux dykes quartzo-feldspathiques présents dans cette zone devraient être analysés pour la recherche de minéralisations en W, car deux dykes rhyolitiques minéralisés en W ont déjà été découverts dans ce secteur. Trois échantillons d'épontes des veines 22 et 24 présentent d'ailleurs de bonnes concentrations en W (135 - 690 ppm).

7.1.5 Lithogéochimie

Roches sédimentaires :

Les données géochimiques des roches sédimentaires de la propriété St-Robert indiquent que ces dernières sont surtout constituées de litharénites et de shales. La composition géochimique et la présence de grains anguleux dans les roches gréseuses suggèrent une provenance sédimentaire d'une source continentale relativement proche du lieu de sédimentation.

Les diagrammes de discrimination d'environnements tectoniques de sédimentation suggèrent un environnement de type marge continental active et possiblement la contribution d'un arc continental. Ces sédiments proviendraient du démantèlement de roches ignées felsiques et sédimentaires quartzitiques probablement issues du massif protérozoïque de Chain Lakes situé à quelques kilomètres au sud de la propriété.

Quoique les indices d'intempérisme chimique (CIA, CIW) aient été affectés par la carbonatation secondaire des roches, la composition de certaines roches faiblement carbonatées indique des valeurs de l'indice CIA légèrement supérieur à 70 % suggérant des conditions d'intempérisme modérée.

Les données lithogéochimiques démontrent que ce sont les roches gréseuses de la propriété qui sont les plus affectées par l'altération hydrothermale et la précipitation des sulfures. La faible perméabilité des shales ne semble pas avoir favorisé la percolation des fluides hydrothermaux. Ces roches argileuses ont certainement créé des barrières imperméables favorisant la focalisation des fluides dans les roches gréseuses.

Roches ignées :

Les roches ignées felsiques constituent un groupe lithologique particulièrement important sur la propriété St-Robert en raison du rôle hautement probable du magmatisme felsique dans la mise en place des minéralisations. Nous avons observé un regroupement des échantillons en trois populations distinctes. À partir des spectres de terres rares, nous avons pu déterminer que ces regroupements reflètent en réalité la présence de trois groupes distincts. Les contrastes observés dans ces éléments traces relativement insolubles ne peuvent s'expliquer par une simple altération. Les roches du groupe A sont les moins évoluées comme en témoigne les concentrations plus élevées en Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , et MgO .

Les roches du groupe B sont plus évoluées que celles du groupe précédent et se distribuent entre les échantillons des groupes A et C. Finalement, les roches du groupe C occupent un domaine de hautes concentrations en SiO_2 typique de compositions granitiques. Les roches ignées de St-Robert sont toutes d'affinité calco-alcaline typique d'un contexte d'arc volcanique. Ce constat s'applique également aux autres intrusions dévoniennes de la région. Les rhyolites montrent cependant des compositions d'arcs volcaniques plus matures. Les granitoïdes de St-Robert semblent peu altérés par rapport aux roches sédimentaires de la Formation de Frontenac. L'absence de lessivage en Na_2O reflète bien ce constat. De plus, ces roches ne présentent pas d'évidences d'enrichissement en Na_2O pouvant indiquer une albitisation et les valeurs de l'indice d'altération hydrothermale (A.I.) d'Ishikawa et al. (1976) se distribuent près de la valeur de 50 % ce qui correspond aux valeurs normalement observées dans des roches magmatiques felsiques non altérées.

7.1.6 Géophysique

Levé sismique :

Les données de réfraction sismique montrent la présence d'une anomalie planaire caractérisée par de faibles valeurs de vitesse sismique correspondant à la faille de St-Robert. Cette anomalie est orientée SO-NE et est parallèle au grain tectonique. Cette structure passe par la zone minéralisée Centre et limite vers le NO l'étendue de l'intrusion de St-Robert. Une seconde zone d'atténuation sismique orientée NNO-SSE passe à environ 150 mètres à l'est de la zone minéralisée Nord. L'intersection entre cette seconde faille et la faille de St-Robert pourrait correspondre à la localisation de la zone aurifère antérieurement décrite dans les rapports de la St-Robert Metals.

Les données sismiques ont également permis de mesurer l'épaisseur de dépôts quaternaires reposant sur le socle rocheux de la propriété. Dans l'ensemble, le terrain situé à l'est de la rivière du Loup est recouvert d'une fine couverture de dépôts glaciaires tandis que le secteur de la zone Centre est marqué localement par une épaisse couverture de sédiments glaciaires pouvant localement atteindre une cinquantaine de mètres. Cette variation d'épaisseur de dépôts meubles complique l'interprétation des données géophysiques mesurées dans cette partie de la propriété.

De plus, les difficultés techniques rencontrées par Mines JAG Ltée, lors de l'implantation de forages dans les zones de fortes épaisseurs de dépôts meubles, pourraient expliquer l'absence d'intersection de la zone aurifère antérieurement recoupée par les forages de la St-Robert Metals.

Levé magnétométrique :

Le traitement des données du levé magnétométrique, réalisé sur la propriété St-Robert, permet de souligner la présence d'une masse intrusive magnétique kilométrique alignée selon un axe parallèle au grain tectonique régionale (SO-NE). La forme de l'anomalie magnétique suggère une source relativement peu profonde. Les résultats des calculs de détermination de profondeur des sources magnétiques par la méthode d'Euler avec un indice structural de $n=1$ suggèrent que le toit de la masse intrusive de St-Robert serait situé à une profondeur de l'ordre de 157 m (+/- 6 m) pour la partie située à l'ouest de la rivière du Loup (secteur de la zone Centre) et à une profondeur de l'ordre de 130 m (+/- 22 m) du côté est de cette même rivière. Nous croyons que la différence observée de part et d'autre de la rivière reflète la présence d'une imposante couverture glaciaire centrée dans le secteur de la zone Centre. Ces estimations de profondeur sont compatibles avec les résultats des levés audiomagnétotelluriques.

La carte des données filtrées (dérivée verticale) suggère la présence de fortes anisotropies magnétiques attribuées à la présence de failles. Une de ces anisotropies correspond à la faille de St-Robert. Cette dernière semble recouper le contact nord-ouest de la masse intrusive. La seconde est orientée selon un axe NNO-SSE, recoupe la masse intrusive et se termine du côté est de la zone minéralisée Nord. Cette structure correspond également à une zone d'atténuation de vélocité sismique indiquant la présence d'une faille. Finalement une discontinuité magnétique abrupte est localisée à la limite ouest de la masse intrusive et semble limiter l'étendu vers l'ouest des minéralisations de la zone Centre.

Levé EM-TBF :

La carte des valeurs de l'anomalie Fraser montre une forte anisotropie orientée parallèle au grain tectonique régional. Les hautes valeurs semblent correspondre aux unités de shales et de shales graphitiques et les faibles valeurs aux unités de grès et de granitoïdes (dykes). Dans la partie centrale de la propriété, on peut dénombrer neuf bandes de hautes valeurs d'anomalie Fraser qui pourraient correspondre aux unités les plus riches en shales.

Cette information peut être utile à des fins sédimentologique et cartographique car la proportion d'affleurements est faible dans ce secteur.

Certaines anomalies EM-TBF sont centrées sur des anomalies magnétiques locales, mais compte tenu de la nature disséminée des minéralisations observées sur le terrain, il est peu probable que ces anomalies soient reliées à des minéralisations.

Toutefois, même si la majorité des anomalies EM-TBF répertoriées sont essentiellement causées par la présence de shales ou schistes graphiteux, Chevé (1990) souligne que « dans la Formation de Frontenac, tous les conducteurs électromagnétiques ne sont peut-être pas que du graphite ». En effet, la présence d'une lentille gabbroïque et basaltique à environ deux kilomètres à l'ouest de la propriété et suivant la direction d'une faille régionale passant sur la propriété pourrait suggérer la présence d'autres lentilles volcaniques et possiblement la présence de sulfures massifs ou encore de gîtes de type SEDEX associés à cet environnement. Ce type de gîte est assez commun dans la région et surtout dans les volcanites de la Formation de Frontenac.

Levés de résistivité électrique et de polarisation provoquée :

Les résultats des différentes campagnes d'acquisition de données de polarisation provoquée indiquent la présence de nombreuses masses de roches électriquement polarisables. Les résultats des premiers levés étant très peu pénétratifs, seules les anomalies détectées dans les secteurs à faible épaisseur de dépôts meubles peuvent indiquer la présence de minéralisations. Dans l'ensemble, le levé réalisé par Phoenix est de loin le plus pénétratif car ayant utilisé une configuration de dipôles de N=1 à N=6. Cette configuration permet une investigation en profondeur et ce malgré la présence d'une forte épaisseur de dépôts quaternaires. Ainsi ces levés ont détecté de fortes anomalies de chargeabilité dans les formations de roches sédimentaires de la propriété. Plusieurs de ces anomalies n'ont jamais été recoupées par forage ce qui implique que le potentiel de découvertes de nouvelles minéralisations est très élevé.

Les données de résistivité électrique apparente mesurées lors du levé de polarisation provoquée permettent de subdiviser le secteur des zones minéralisées Centre et Nord en trois domaines.

Le premier domaine (I) situé vers le NO et englobant une grande partie de la zone Nord est caractérisé par de très hautes valeurs de résistivité électrique ($> 3000 \text{ Ohm m}$) reflétant une signature dominée par le socle rocheux présent sous une fine couverture de dépôts glaciaires. Le domaine II situé dans le centre du périmètre du levé est caractérisé par de faibles valeurs de résistivité électrique reflétant la présence d'une imposante couverture glaciaire corroborée par les données du levé sismique. Le domaine III situé vers le sud-est montre des caractéristiques géoélectriques semblables au domaine I ce qui implique la présence d'une faible épaisseur de couverture quaternaire.

Levé gravimétrique :

Le levé gravimétrique réalisé par l'INRS a montré la présence de deux domaines distincts. Le premier est constitué de hautes valeurs d'anomalie de Bouguer et le second par de faibles valeurs. Ces domaines semblent en partie séparés par la faille de St-Robert. Les stations situées au nord de la faille de St-Robert montrent de plus faibles valeurs d'anomalie de Bouguer tandis que celles situées au sud de la faille montrent de plus hautes valeurs.

Le domaine de faibles valeurs d'anomalie de Bouguer au nord de la zone de faille principale (FS1-FM1) pourrait s'expliquer par un épaississement de la séquence de roches sédimentaires et à l'opposé l'augmentation des valeurs observées au sud pourrait refléter une remontée du socle précambrien présent sous les nappes de roches appalachiennes. Ce contexte tectonique serait compatible avec la présence à une dizaine de kilomètres vers le sud du socle précambrien du massif de Chain Lake.

Contrairement aux cartes du levé magnétométrique, les cartes des données gravimétriques ne montrent pas d'anomalie associée à la masse intrusive de St-Robert. Ceci s'explique par la nature felsique de la masse intrusive et donc de l'absence de contraste de densité avec les roches sédimentaires encaissantes.

L'examen attentif de la carte de l'anomalie de Bouguer montre des perturbations dans le secteur des zones minéralisées Centre et Nord. Les limites ouest des zones Centre et Nord semblent affectées par un déplacement dextre perpendiculaire au grain tectonique régional. Cette perturbation locale pourrait avoir des implications métallogéniques pour expliquer la présence de minéralisations dans cette partie de la propriété.

Levé audiomagnétotellurique:

Les deux sections audiomagnétotelluriques réalisées à l'hiver 2012 ont permis de préciser l'architecture des failles et l'agencement des différentes unités géoélectriques et ce jusqu'à 1500 mètres de profondeur. Ces données ont permis d'évaluer la profondeur d'enfouissement de l'intrusif de St-Robert et d'investiguer la nature de son contact inférieur. À cet effet, les sections de résistivité électrique montrent clairement la présence d'une structure électriquement conductrice localisée au contact inférieur de la masse intrusive. Les sections audiomagnétotelluriques montrent que la base de la masse intrusive est située à une profondeur de l'ordre de 300 mètres de part et d'autre de la rivière du Loup. De plus, la première section permet de visualiser en profondeur la position et le pendage de la faille de St-Robert qui pente clairement vers le sud-est qui serait associée à un mouvement normal.

Selon l'imagerie géoélectrique obtenue avec l'inversion des données AMT, une structure électriquement conductrice (faibles valeurs de résistivité électrique) passe sous la masse intrusive et se prolonge vers le sud des sections. Cette structure semble reliée à la présence d'une nappe de chevauchement délimitant des roches très résistives en profondeur (granitoïdes, socle ?) et moins résistives en surface (roches de la Formation de Frontenac). Une autre structure plus profonde descend vers le sud avec un pendage intermédiaire. Cette structure semble affecter le socle rocheux et pourrait constituer la limite entre deux blocs lithologiques. Ces blocs seraient entre autres constitués de roches plus denses vers le sud et moins denses vers le nord expliquant ainsi les contrastes des valeurs de l'anomalie de Bouguer observés dans la région de St-Robert.

Généralités provenant de l'étude des données géophysiques :

L'intrusion St-Robert est mineure et doit certainement correspondre à une ramification d'une plus grande intrusion qui pourrait avoir été détectée par le levé audiomagnétotellurique. En effet, une masse subcirculaire a été mise en évidence dans la partie sud de la propriété. Cette dernière pourrait correspondre à une masse intrusive plus importante qui pourrait contenir des minéralisations porphyriques.

Il existe de nombreuses failles régionales parallèles au grain structural des Appalaches et aux failles présentes sur la propriété. Ces failles ont pu servir de canalisations pour des fluides minéralisateurs et devraient en conséquence être considérées comme des vecteurs de minéralisations et plus spécifiquement comme d'éventuelles cibles d'exploration.

Notez que de nombreux indices minéralisés de la région sont situés sur, ou en bordure, de ces plans de faiblesse.

D'après la géophysique régionale (Bernard, 1987; Spencer et al., 1989; Stewart et al., 1986), les failles de la rivière Victoria, de Sandy Stream et de Woburn semblent prendre leur origine au niveau du complexe de Chain Lakes tandis que celle de la Guadeloupe prend son origine dans le socle du Grenville (Bernard, 1987; Spencer et al., 1989; Stewart et al., 1986). Les failles de Sandy Stream et de Woburn correspondraient à des rétrochevauchements (Bernard, 1987; Spencer et al., 1989; Stewart et al., 1986).

7.2 Potentiel minéral de la propriété St-Robert

L'intégration de l'ensemble des données géophysiques, géologiques et pédogéochimiques de la propriété de St-Robert nous a permis de déterminer de nouvelles cibles d'exploration. Avant de présenter ces nouvelles cibles, il est important de souligner les ressources historiques des différents corps minéralisés.

Depuis les années 1930, de nombreuses études ont été effectuées sur la propriété afin de caractériser le tonnage et la teneur du gisement.

Lacombe (1958) effectua le calcul des réserves de la propriété. D'après les résultats des forages et des travaux souterrains, il détermina que pour les 180 premiers mètres (600 pieds) de profondeur, les trois zones minéralisées contenaient 895 107 tonnes de minerai prouvé et 2 167 002 tonnes de minerai probable. Le tableau 7.1 présente ses résultats.

Tableau 7.1 : Tableau récapitulatif des ressources historiques calculées par Lacombe (1958). La zone Centre correspond aux corps minéralisés 2, 3 et 4. La zone Sud correspond au corps minéralisé 1 et la zone Nord aux corps minéralisés 5 a et 5b.

Corps minéralisés	1	2	3	4	5a	5b
Tonnage (T) prouvé	147 764	110 506	139 333	129 024	317 280	51 200
Teneur du minerai	Au = ? Ag = 4,4 oz/t Pb = 1,5 % Bi = 0,159 % WO ₃ = 0,128 %	Au = 0,002 oz/t Ag = 6,7 oz/t Pb = 1,37 % Bi = 0,15 % WO ₃ = 0.15 %	Au = 0,40 oz/t Ag = 1,10 oz/t	WO ₃ = 0,60 %	WO ₃ = 0,59 %	Ag = 0,80 oz/t Pb = 16,20 % Bi = 0,18 % WO ₃ = ?
Longueur de l'amas (m)	232	226	168	293	146	390
Largeur de l'amas (m)	35	24	76	55	11	0,30
Extension verticale connue de l'amas (m)	97	107	58	43	46	152
Tonnage (T) probable	206 869	280 000	253 333	215 040	1 211 760	-

Le peu d'échantillons prélevés lors des travaux de 2011 et le fait qu'ils aient été échantillonnés en surface et plus spécifiquement sur les veines de quartz ne nous permettent pas de vérifier ces données. Les ressources estimées dans les années 50 devraient être considérées dans la catégorie des ressources historiques. Néanmoins, à l'aide de l'extension Target du logiciel Oasis Montaj, nous avons créé des cartes en trois dimensions des lithologies et des résultats d'analyses issues des journaux de sondage afin d'obtenir une imagerie permettant d'étudier l'aspect des minéralisations et de la géologie plus en profondeur.

Or :

Nous avons pu constater qu'il est très probable que la zone Centre (secteur Lacombe) contienne de l'or en quantité économique. Les 84 analyses réalisées sur les forages de St-Robert Metals dans les années 1950 ont donné une concentration moyenne en or de 29,4 g/t, ce qui est loin d'être négligeable. D'après nos observations, cette zone ferait au minimum 100 mètres de diamètre. La présence d'or dans ce secteur est de plus supportée par les anomalies en or détectées dans les sols et par les anomalies en or détectées dans les sédiments de ruisseaux (données du MRNFAQ).

Il n'existe plus de mine d'or en activité dans les Appalaches du sud du Québec. Toutefois, la compagnie Golden Hope a estimé des ressources indiquées sur sa propriété Timmins-Bellechasse de 313 900 onces d'or (2,9 millions de tonnes à 3,36 g/t d'Au) et des ressources présumées de 102 000 onces d'or (2,17 millions de tonnes à 1,46 g/t d'Au). De plus, à quelques dizaines de kilomètres de St-Robert, la compagnie Uragold Bay rapporte un potentiel de plus de 200 000 onces d'or qui serait présent dans une unité de diamictite glaciaire de la région de Saint-Simon-les-Mines. La présence d'indices majeurs en or dans la région semble confirmer ce qui est encourageant pour la poursuite des activités d'exploration sur la propriété St-Robert.

Tungstène:

Les analyses effectuées sur de nombreuses carottes de forage de la propriété St-Robert ont bien souvent pris en compte seulement l'or et quelques fois l'argent ou le tungstène. De plus, les analyses ont été réalisées uniquement sur les veines de quartz minéralisées et très rarement sur les épontes.

Or, la scheelite se retrouve principalement dans les dykes porphyriques, comme en témoigne la présence d'un dyke porphyrique contenant 0,6% de tungstène dans le tunnel Lacombe et la « nouvelle découverte » dans la zone Nord qui contient jusqu'à 14 % de tungstène. Le tungstène a d'ailleurs été plus souvent recherché dans la zone Centre que dans la zone Nord alors qu'il semblerait présent en quantité économique dans la zone Nord. Il serait donc nécessaire d'étudier le contenu en tungstène de la zone Nord.

Dans les autres zones, le tungstène est présent sporadiquement et pourrait constituer un sous-produit intéressant. Les très bonnes concentrations en tungstène obtenues par le passé, additionnées aux fortes concentrations que nous avons obtenues lors de l'échantillonnage en rainurage nous poussent à croire que le tungstène pourrait être un des principaux éléments économiques de la propriété.

Les mines de tungstène contiennent généralement des teneurs d'environ 0,1 à 0,3 % de tungstène pour des tonnages variant du millier au million de tonnes. Par exemple, le gîte de Mount Pleasant au Nouveau-Brunswick a un tonnage de 50 000 tonnes de minerais de W pour une teneur de seulement 0,21 %.

Bismuth :

Très peu de forages ont été réalisés dans la zone Nord en raison de difficultés d'accès. Nous avons toutefois observé de très bonnes concentrations en Bi lors de l'échantillonnage par rainurage de cette zone. Ce dernier est un élément assez rare et présent bien souvent en faibles quantités.

La propriété St-Robert pourrait également avoir un potentiel économique en bismuth. Il est en effet présent en bonnes quantités (0,01 à 0,89 %) dans la zone Nord. Par comparaison, les gisements les plus riches en bismuth actuellement exploités au Canada sont :

- le gisement NICO situé dans les Territoires du Nord-Ouest, de type IOCG contenant de l'or, du cobalt, du bismuth et du cuivre; sa concentration en bismuth varie de 0,13 à 0,27 %.
- Le Mount Pleasant au Nouveau-Brunswick de type porphyrique à Mo, W et Bi dont les teneurs sont de 0,1 %, 0,21 % et 0,08 % respectivement.

Dans ces deux mines, le bismuth est récupéré comme produit secondaire. De plus, il n'existe qu'une seule mine au monde dont le produit principal soit le bismuth. C'est la mine Tasna en Bolivie et son activité est en suspens depuis les années 1990. Pour toutes les autres mines, le bismuth correspond à un sous-produit des mines de Pb, W, Sn, Cu ou Ag.

Le prix du bismuth est plus élevé que celui du cuivre, du plomb et du zinc. En 2011, il valait 26 \$/kg. D'après l'USGS, la production mondiale annuelle de bismuth en 2010 était de 8 900 tonnes. La majorité du marché est représenté par la Chine dont la production annuelle en 2010 était de 6 500 tonnes. Le plus gros producteur mondial de bismuth est la mine de Hunan Shizhuyuan qui produit environ 700 tonnes de bismuth par an. Les réserves mondiales en bismuth sont estimées à 320 000 tonnes dont seulement 5000 tonnes se trouvent au Canada.

Argent, plomb, zinc :

Enfin, l'argent, le plomb et le zinc semblent également être présents en bonnes quantités, mais ils ont été très rarement analysés dans les anciens forages. La région est propice à la présence de minéralisations importantes en Pb, Zn et Ag et nous pensons qu'il réside un large potentiel dans la zone pédogéochimique enrichie en Pb, Ag et Bi qui s'étend de l'ouest de la zone Centre au nord de la zone Sud. Cette zone serait d'ailleurs une prolongation de la minéralisation de la zone Sud et n'a jamais été forée.

De bonnes teneurs en argent ont également été retrouvées dans la zone Centre avec un échantillon de surface présentant 1280 g/t d'Ag. Dans ce même secteur, de nombreux échantillons de forage montrent de hautes teneurs en Ag. La galène argentifère étant souvent concentrée dans la matrice gréseuse des roches sédimentaires, les épontes des veines minéralisées devraient être systématiquement analysées pour évaluer le véritable potentiel en Ag.

7.3 Nouvelles cibles d'exploration sur la propriété St-Robert

L'étude approfondie de la propriété St-Robert nous permet d'établir une liste des principales zones anomaliques découlant de la compilation des données géochimiques, pédogéochimiques, géologiques et géophysiques. La figure 7.1 présente les principales zones d'intérêts pour l'exploration minérale. Nous recommandons donc de vérifier par forage ou décapage ces différentes zones dans l'ordre de priorité suivant :

7.3.1 Priorité élevée

Zone I : Cette zone correspond au domaine pédogéochimique riche en Pb, Ag, Bi (W) situé dans la prolongation des zones Sud et Nord. Cette zone est située du côté nord du chemin de la mine. Quasiment aucun forage n'a été réalisé dans cette partie de la propriété et le mort-terrain ne semble pas très épais (environ 15 mètres). Cette zone est d'autant plus intéressante qu'elle est située dans le corridor de la faille de St-Robert (failles magnétique et sismique FM1, FS1 et « creux » gravimétrique FG1). De plus, elle est recoupée par de nombreuses anomalies de polarisation provoquée suggérant la présence de sulfures disséminés.

Zone II : Cette zone correspond à la zone minéralisée Centre et constitue un secteur d'intérêt pour l'or. Les études en trois dimensions de la zone Centre, la pédogéochimie, les concentrations en or dans les sédiments de ruisseau au pied du bassin versant de la zone Centre et l'augmentation des teneurs en or vers l'est dans les veines 32 et 34 étayent cette hypothèse. De plus, cette zone est située à l'intersection de la *faille sismique FS1* et du « creux » gravimétrique FG2 correspondant à un milieu adéquat pour la formation de gisement de type or orogénique.

Zone III : Cette zone correspond à la zone minéralisée Nord. Elle est située dans le prolongement de la zone Sud et de la zone d'intérêt I (fig. 7.1) et est recoupée par de nombreuses anomalies magnétiques. Très peu de forage ont été réalisés et les analyses sont souvent axées sur les veines de quartz alors que deux indices de minéralisation en W dans des dykes porphyriques sont situés dans cette zone. De plus, l'argent, le plomb et le bismuth ont été largement sous-analysés dans ce secteur.

7.3.2 Priorité moyenne

Zone IV : Cette zone est située au sud et sud-est de l'intrusion de St-Robert et est recoupée par de nombreuses anomalies magnétiques, de polarisation provoquée et EM-TBF. L'élément à l'origine de l'anomalie semble être orienté parallèlement aux veines minéralisées des zones Centre et Nord. De plus, il y a de grandes chances que cette anomalie dérive de la structure VII très résistive que nous avons observée sur la section 2 du levé d'audiomagnétotellurique. Ce secteur n'a pratiquement pas été foré et, compte tenu de la persistance des anomalies de chargeabilité (IP) pour de grands espacements de dipôles (N=5 et 6), l'épaisseur de la zone contenant des sulfures semble importante. Suite à un levé pédogéochimique dans ce secteur la zone IV pourrait être reclassée comme zone de haute priorité.

Zone V : Cette zone est située au nord de l'intrusion de St-Robert, au niveau des zones pédogéochimiques riches en Ag, Bi, Mo et WO_3 (zones VII et X). Elle est recoupée par le corridor de la faille de St-Robert pouvant avoir aidé à la circulation des fluides minéralisateurs. Les rares forages implantés dans cette zone ont intercepté des veines de quartz minéralisées en cosalite et molybdénite avec des dykes porphyriques minéralisés en scheelite. De plus, lors de l'été 2011, nous avons répertorié la présence de veines de quartz minéralisées en pyrite, galène dans cette zone.

Enfin, l'intrusion St-Robert devrait faire l'objet d'une investigation par forage afin de déterminer si oui ou non elle est minéralisée. Dans ce secteur, le toit de l'intrusion serait à une profondeur d'environ 150 mètres.

7.3.3 Faible priorité

Les **zones VI, VII et VII** correspondent aux zones pédogéochimiques I, II et VII et devraient également être vérifiées compte tenu des bons résultats obtenus grâce à cette méthode.

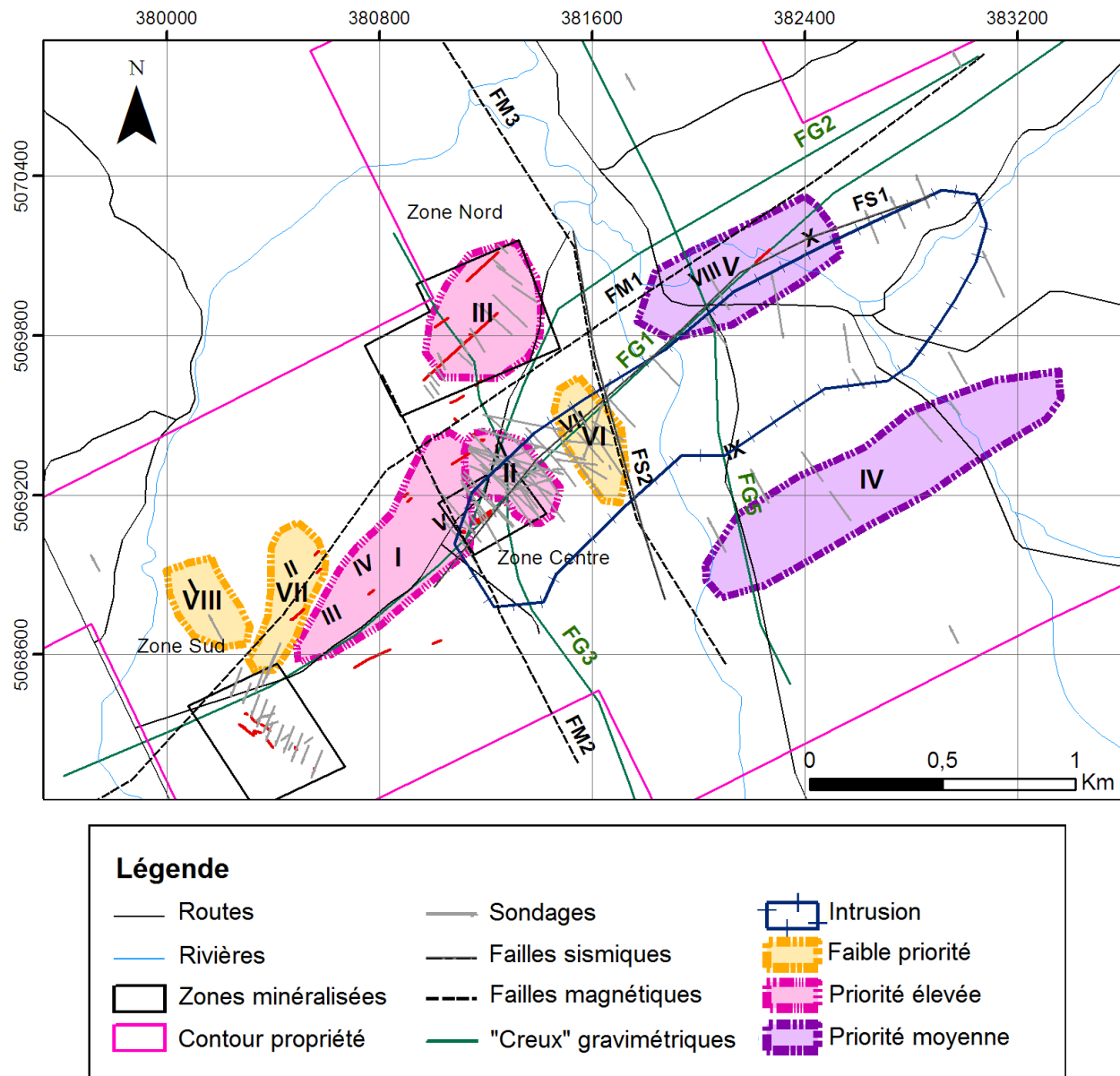


Figure 7.1 : Carte récapitulative des principales cibles pour d'éventuels forages sur la propriété St-Robert.

CONCLUSION

Les travaux réalisés depuis août 2010 au sein de la propriété St-Robert ont permis de comprendre un peu mieux son contexte géologique, géodynamique et métallogénique.

La propriété St-Robert est située dans un contexte métallogénique régional particulier où l'on retrouve de nombreux types de minéralisations (VMS, SEDEX, or orogénique, placers, porphyre à Mo, skarns à W, filons mésothermaux à Ag-Pb-Zn-Cu, ...) et nous pensons que le gîte de St-Robert constitue un amalgame de ces différents types de minéralisation. En effet, au sein de la propriété, nous avons pu répertorier plusieurs filons mésothermaux riches en Ag, Pb et Zn situés distalement par rapport à l'intrusion St-Robert qui est probablement à l'origine de la circulation des fluides hydrothermaux. Des dykes porphyriques à W et possiblement à Mo ont également été répertoriés au sein de la propriété et sont situés proches de l'intrusion de St-Robert. Il y a également de fortes chances que l'intrusion de St-Robert soit elle-même minéralisée ce qui augmenterait grandement le potentiel économique de la propriété. Enfin, les forages des années 1950 ont décelé de fortes concentrations en or. Si cette observation est vérifiée, compte tenu de la proximité du couloir de faille de St-Robert avec la zone minéralisée en or, il se peut que l'on ait affaire à un gîte de type or orogénique.

Les nombreuses incertitudes concernant la minéralisation sur la propriété ne nous permettent malheureusement pas de dire si oui ou non le potentiel minéral de la propriété St-Robert est important. Cependant, la présence de très bonnes concentrations en Pb, Bi et W observées lors de l'analyse des veines de quartz minéralisées suggère néanmoins qu'il existe un réel potentiel dans le sous-sol de la propriété.

De nombreuses cibles d'explorations pour la région peuvent donc ressortir de cette étude :

- les grandes failles régionales telles que les failles de la Guadeloupe, de la rivière Victoria et de Woburn ainsi que les couloirs de déformation associés peuvent être porteurs de minéralisations aurifères;
- les volcanites présentes dans cette région peuvent être porteuses de minéralisations de type VMS comme le montre l'exemple des indices Clinton dans les volcanites de Frontenac;
- certaines anomalies de type EM-TBF dans les roches sédimentaires pourraient correspondre à des minéralisations de type SEDEX étant donnée la présence d'activités hydrothermales importantes dans la région;

- les nombreuses intrusions granodioritiques dévoniennes de la région peuvent également renfermer des minéralisations en Mo, Cu et W comme le montre le cas de l'intrusion Ste-Cécile-St-Sébastien.

En conclusion, pour les travaux à venir, nous recommandons l'analyse systématique des épontes des veines de quartz minéralisées ainsi que les dykes porphyriques. De même, compte tenu des très bons résultats obtenus à l'aide des levés pédogéochimiques ainsi que des levés audiomagnétotelluriques, la poursuite de ces levés sur l'ensemble de la propriété pourrait constituer un atout afin de déterminer de nouvelles zones minéralisées. Enfin, l'analyse en Bi, W, Ag, Pb, Au et Zn des échantillons issus de décapages ou l'investigation par forage des différentes zones d'intérêts présentées dans la partie précédente pourraient s'avérer primordiales pour la suite des opérations sur la propriété St-Robert.

REFERENCES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada. Cartes interactives : Les sols du Canada [en ligne]. Disponible sur : <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/webmaps.html> (consulté le 14/06/2012).
- Albee, A. L. et Boudette, E. L., 1972. Geology of the Attean Quadrangle, Somerset County, Maine. U.S. Geological Survey Bulletin, 1297 : 110 p.
- Allard, M. et Bois, D., 1999. La géophysique appliquée à l'exploration minérale. Centre collégial de développement de matériel didactique. 352 p.
- Allen, J. S., Thomas W. A., Lavoie, D., 2010. The Laurentian margin of northeastern North America. In Tollo, R. P., Bartholomew, M. J., Hibbard, J. P., Karabinos, P. M. From Rodinia to Pangea: The Lithotectonic Record of the Appalachian Region. Society of America Memoirs 206 : 71-90.
- Asselin, E., 2002. Rapport préliminaire sur les résultats palynologiques obtenus pour des séries d'échantillons provenant du Siluro-Dévonien de l'Estrie et de la Beauce du sud du Québec. Geological Survey of Canada, Internal report.
- Atlas du Canada. Carte des dépôts de surface de la Beauce et d'une partie de la région de Québec [en ligne]. Disponible sur : <http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/index.html> (consulté le 14/06/2012).
- Ayuso, R.A., 1986. Lead-isotopic evidence for distinct sources of granite and distinct basements in the northern Appalachians, Maine. *Geology*, 14 : 322-325.
- Ayuso, R. A., Horan, M. F., Criss, R. E., 1988. Pb and O isotopic geochemistry of granitic plutons in northern Maine. *American Journal of Science*. 288-A : 421- 460.
- Barker, F., 1979. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. In Barker, F. (ed.) *Trondhjemites, dacites, and related rocks*. Elsevier, Amsterdam, 1-12.
- Bernard, D., 1987. Études structurale et stratigraphique du synclinorium de Connecticut Valley - Gaspé dans le sud-est du Québec, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, 29 p.
- Bhatia, M. R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology* 91 (6) : 611–627.

- Bhatia, M. R. et Crook, K. A. W., 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92 : 181–193.
- Blakely, R.J., 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press, UK.
- Blakely, R.J. et Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of sources bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, 51: 1494–1498.
- Blain, M., 1989. Caractérisation géochimique des principales séries volcaniques non ophiolitiques de l'Estrie et de la Beauce, Québec. Mémoire de maîtrise, UQAM. 118 p.
- Boone, G. M., 1981. Bedrock Geology of the State of Maine Portion of the Sherbrooke 2 degree Quadrangle (1980) and Transverse Fault in the East Central Part of the Sherbrooke 2 degree Quadrangle (1981). Maine Geological Survey, Open file No. 81-2. 14 p.
- Bouma, A. H., 1962. *Sedimentology of some flych deposits*. Amsterdam, Elsevier Pub. Co., 168 p.
- Bourne, J., 1987. Pétrographie et géochimie des plutons granitiques du sud-est des Cantons de l'Est, Québec, partie A – Les plutons dévoniens. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- Bourne, J., 1989. Pétrographie et géochimie des plutons granitiques d'âges dévonien et crétacé de l'Estrie. Ministère des ressources naturelles et de la faune. 129 p. ET 88-07
- Bourque, P. A., 2001. Sea level, synsedimentary tectonics, and reefs; implications for hydrocarbon exploration in the Silurian-lowermost Devonian Gaspé Belt, Québec Appalachians: *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 49 : 217–237.
- Bradley, D. C.; Tucker, R. D.; Lux, D.; Harris, A. G.; McGregor, D. C., 1998. Migration of the Acadian orogen and foreland basin across the northern Appalachians. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 98-770, 79 p.
- Brown, C. G., Thorpe, R. S., Webb, P. C., 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society (London)* 141 : 411– 426.
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18 (3) : 605-635.

- Castonguay, S., et Tremblay, A., 2003, Tectonic evolution and significance of Silurian-Early Devonian hinterland-directed deformation in the internal Humber Zone of the southern Quebec Appalachians: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 : 255–268.
- Cattalani, S., 1987. A fluid inclusion and stable isotopic study of the Saint-Robert, W-Ag-Bi vein deposit Eastern Townships, Québec. Thèse de maîtrise, université McGill. 128 p.
- Cawood, P. A., McCausland, P. J. A., Dunning, G. A., 2001. Opening Iapetus: Constraints from the Laurentian margin in Newfoundland. *Geological Society of America Bulletin*, 113 : 443-453
- Central Federal Lands Highway Division (CFLHD). Mapping lithology. Disponible sur : <http://www.cflhd.gov/resources/agm/engApplications/SubsurfaceCharacter/613MappingLithology%281%29.cfm> (consulté le 3/09/2012).
- Chevé, S. R., 1990. Étude tectono-stratigraphique, pétrologique et métallogénique de la région de Lac-Mégantic (Québec). Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal, 1096 p.
- Courchesne, F. et Hendershot, W. H., 1997. La genèse des podzols. *Géographie physique et Quaternaire*, 51 (2) : 235-250.
- Cousineau, D., 2007. Revue visuelle. [Image en ligne]. Disponible sur : <http://deniscousineau.pbworks.com/w/page/17467599/Revue%20visuelle> (consulté le 14/06/2012).
- Cunningham, C. G., Zartman, R. E., McKee, E. H., Rye, R. O., Naeser, C. W., Sanjin, O., Ericksen, G. E., Tavera, F., 1996. The age and thermal history of Cerro Rico de Potosi, Bolivia. *Mineralium Deposita*, 31 : 374-385.
- De Souza, S. et Tremblay, A. 2010. The Rivière-des-Plante ultramafic Complex, southern Québec : Stratigraphy, structure, and implications for the Chain Lakes massif. In Tollo, R. P., Bartholomew, M. J., Hibbard, J. P., Karabinos, P. M. From Rodinia to Pangea: The Lithotectonic Record of the Appalachian Region. *Society of America Memoirs*, 206 : 123-139
- Dostal, J., Laurent, R. et Keppie, J. D., 1993. Late Silurian-Early Devonian rifting during dextral transpression in the southern Gaspé Peninsula (Quebec): petrogenesis of volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30 : 2283-2294.

- Ells, R. W., 1887. Rapport sur la géologie d'une portion des Cantons de l'Est, se rapportant plus particulièrement aux comtés de Compton, Stanstead, Beauce, Richmond et Wolfe. In Rapport annuel, vol. II (1886). Commission Géologique et d'Histoire Naturelle du Canada, 74 p.
- Fourcade, S., et Allegre, C. J. 1981. Trace element behaviour in granite gneiss. A case study. The calc. Alkaline plutonic association. Contributions to Mineralogy and Petrology, 17 : 177-195.
- Frédéric, J.R., 1977. Compilation sur la propriété de W-Bi-Pb-Ag-Au de JAG MINES LTÉE, Région de Saint-Robert, Canton de Marlow et Risborough, Comté de Beauce Sud, Québec. 41 p. Rapport inédit.
- Frédéric, J.R., 1980. Rapport de travaux de mise en valeur géophysique et décapages, Cantons de Marlow-Rangs VI et VII, Risborough-Rangs XV et XVI, Comté de Beauce Sud Québec. 11 p. Rapport inédit.
- Frédéric, J.R., 1983a. 2^{ème} Rapport intérimaire des travaux en cours. 22 p. Rapport inédit.
- Frédéric, J.R., 1983b. Rapport de travaux, Campagne 1982, Cantons de Marlow et Risborough, Beauce Sud-Québec. 80 p. Rapport inédit.
- Frédéric, J.R., 1984a. Résultats de la campagne de sondage, compilation, interprétation et recommandations. Rapport inédit.
- Frédéric, J.R., 1984b. Compilation des données de Sondages, géochimie des sols et géophysique. Rapport inédit.
- Gauthier, M., Chartrand, F., Trottier, J., 1994. Metallogenic Epochs and Metallogenic Provinces of the Estrie-Beauce Region, Southern Quebec Appalachians. Economic Geology, 89 : 1322-1360.
- Géophysique GPR., 1983. Levé de sismique réfraction. Propriété Saint-Robert, Canton de l'est. 11 p. Rapport inédit.
- Gerbi, C. C., Johnson, S. E., Aleinikoff, J. N. 2006. Origin and orogenic role of the Chain Lakes massif, Maine and Quebec. Canadian Journal Earth Science, 43 : 339-366.
- Grant, J.A., 1986. The isocon diagram: a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration, Economic Geology, 80 :1976–1982.

- Güven, N., 1970. Compositional and structural relationships between phengites and illites. *Clays and Clay Minerals*, 18 : 233-235.
- Harnois L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55 : 319-322
- Harris, N. B. W., Pearce, J. A., Tindle, A. G., 1986. Geochemical characterization of collision zone magmatism. In: Coward, A.C., Reis, A.C. (Eds.), *Collision Tectonics*. In: Special Publication Geological Society, 67-81.
- Hart, S. D. et Reid, M. R., 1991. Rb/Cs fractionation: A link between granulite metamorphism and the S-process. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 : 2379–2383.
- Heizler, M., Lux, D. R., Decker, E. R., 1988. The age and cooling history of the Chain of Ponds and Big Island plutons and Spider Lake granite, west-central Maine and Quebec. *American Journal of Science*, 288 : 925–952.
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core and Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*. 58 : 820- 829.
- Hibbard, J. P., Van Staal, C. R., Rankin, D. W., 2007. A comparative analysis of pre-Silurian crustal building blocks of the northern and the southern Appalachian orogen: *American Journal of Science*, 307 : 23-45.
- Hibbard, J. P., Van Staal, C. R., Rankin, D. W., Williams, H., 2006. Lithotectonic Map of the Appalachian Orogen, Canada-United States of America : Geological Survey of Canada Map 2096A, scale 1: 1 500 000, 2 sheets.
- Hodych, J. P., et Cox, R. A., 2007. Ediacaran U-Pb zircon dates for the Lac Matapédia and Mt. St.-Anselme basalts of the Quebec Appalachians: support for a long-lived mantle plume during the rifting phase of Iapetus opening. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 44 (4) : 565–581.
- Hueber, F. M., Bothner, W. A., Hatch, N. L., Finney, S. C., Aleinikoff, J. N., 1990. Devonian plants from southern Quebec and northern New Hampshire and the age of the Connecticut Valley trough. *American Journal of Sciences*, 290 : 360-395.
- Institut De La Statistique Du Québec. Données relatives aux températures et aux précipitations enregistrées dans 40 stations météorologiques, par région administrative et MRC ou territoire équivalent, Québec, 1971-2000. Disponible sur : www.stat.gouv.qc.ca (consulté le 14/06/2012).

- Irvine, T. N. et Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 : 523-548.
- Ishikawa Y., Sawaguchi T., Iwaya S., Horiuchi M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos; *Mining Geology*, 26 : 105-117.
- Jahrling, C. E., 1983. Geophysical, structural and stratigraphic relations across the Monroe Line and related contacts in the Indian Stream area, northern New Hampshire. *Mémoire de maîtrise*, University of New Hampshire, New Hampshire, 100 p.
- Jébrak, M. et Marcoux, E., 2008. Géologie des ressources minérales. Association géologique du Canada, Ressources naturelles et Faune Québec, Gouvernement du Québec, 191-198.
- Keppie, J. D., et Dostal, J., 1994. Late Silurian-Early Devonian transpressional rift origin of the Quebec Reentrant, Northern Appalachians; constraints from geochemistry of volcanic rocks: *Tectonics*, 13 : 1183–1189.
- Koita, M., 2011. Contribution de la compilation et la réinterprétation des données géophysiques à l'exploration minière du prospect de Saint-Robert, propriété de JAG Mines Ltée (Québec). *Mémoire de stage de fin d'étude*. Université Cadi Ayyad, 127 p.
- Kusky, T. M., Chow, J. S., Bowring, S. A., 1997. Age and origin of the Boil Mountain ophiolite and Chain Lakes massif, Maine: implications for the Penobscottian orogeny. *Revue canadienne des Sciences de la Terre*, 34 : 646-654.
- Labrègue, P. C., 1981. Levé magnétométrique. Géo-Auscultex International Ltée, 5 p. Rapport inédit.
- Lacombe, P. G., 1958. Progress report. St-Robert Metals Corporation. 6p.
- Laflèche, M. R., Camiré, G., Jenner, G. A., 1998. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Québec, Canada. *Chemical Geology*, 148 : 155-136.
- Lafrance, B., 1995. Nouvelles données stratigraphiques et structurales dans la partie sud-est du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé, Appalaches du sud du Québec. *Mémoire de maîtrise*, INRS. 68 p.
- Lebel, D. et Tremblay, A., 1993. Géologie de la région de Lac-Mégantic. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DV 93-04.

- Lebel, D. et Tremblay, A., 1992. Géologie de la région de Lac-Mégantic. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DV 92-02, 21-22.
- Lebel, D., Chevé, S. et Tremblay, A., 1992. Les terrains siluriens et dévonien du sud-est du Québec : problématique et potentiel économique. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DV 92-03, 11-13.
- Le Maitre, R. W., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of igneous rocks. Blackwell, Oxford, 193 p.
- Lepage C. A., Foley, M. F., Thompson, W. B., 1991. Mining in Maine : Past, Present, and Future. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.maine.gov/doc/nrimc/mgs/explore/mining/minemaine.htm> (consulté le 18/09/2012).
- Les MINES J.A.G. Itée. 1981. Campagne géophysique de décembre 1981, Propriété St-Robert, Cantons de Marlow et Risborough. 33 p.
- Lyons, J. B., Aleinikoff, J. N. et Zartman, R. E., 1986. Uranium-Thorium-lead ages of the Highlandcroft plutonic suite northern New England. American Journal of Science, 286 : 489-509.
- Lyons, J. B., Bothner, W. A., Moench, R. H., Thompson, J. B., 1997. Bedrock Geologic Map of New Hampshire: New Hampshire Department of Environmental Services and United States Geological Survey, scale 1:250,000, two sheets.
- Magnetics. Geophysical Surveying Using Magnetics Methods : Susceptibilities of Rocks and Minerals. Disponible sur : <http://gretchen.geo.rpi.edu/roecker/AppGeo96/lectures/mag/rocksus.html> (consulté le 2/09/2012).
- Marleau, R. A., 1968. Région de Woburn-Mégantic-est-Armstrong, comtés de Frontenac et de Beauce. Ministère des Richesses Naturelles du Québec. RG 131, 60 p.
- Marleau, R. A., 1958. Régions de Mégantic-est et d'Armstrong, districts électoraux de Frontenac et de Beauce. Ministère des Mines, Québec. RP 362, 7 p.
- Marvinney, R. G., 1986. Tectonic implication of stratigraphy, structure and métamorphisme in the Penobscot Lake region, northwestern Maine. Thèse de Ph.D, Syracuse University, 269 p.

- McLennan, S. M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21 : 169-200
- McLennan S. M., 1993. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101 : 295–303
- MRNF, 2002. Carte géologique du Québec. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. DV 2002 04. 1 carte.
- Moench, R. H., 1993. Highlights of metamorphic stratigraphy and tectonics in western Maine to northeastern Vermont. Field trip guidebook for the northeastern United States: 1993 Boston GSA, volume 2, contribution no. 67, University of Massachusetts, Amherst, Mass, 01-32.
- Moench, R. H., 1992. The "Piermont allochthon" in the Littleton-Moosilauk area of west central New Hampshire- Reply : *Geological Society of America Bulletin*, 103 : 1541-1545.
- Moench, R. H. et Aleinikoff, J. N., 1991. Geologic map of the Littleton- Moosilauke-Piermont area, NH-VT: Type area of the Piermont allochthon. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 23 (1) : 106.
- Moench, R. H. et Aleinikoff, J. N., 2003. Stratigraphy, geochronology, and accretionary terrane settings of two Bronson Hill arc sequences, northern New England. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28 : 113–160.
- Moench, R. H., Boone, G. M., Bothner, W. A., Boudette, E. L., Hatch, N. L., Jr., Hussey, A. M., II, Marvinney, R. G., Aleinikoff, J. N., 1995, Geologic map of the Sherbrooke-Lewiston area, Maine, New Hampshire, and Vermont, United States, and Québec, Canada: United States Geological Survey Map I-1898 D, échelle 1:250,000, et texte, 56 p.
- Nesbitt, H. W. et Young G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299 : 715-717.
- Nesbitt, H. W. et Young G. M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta*, 48 : 1523–1534
- Nesbitt, H. W. et Young G. M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 97: 129–147
- Osberg, P. H., Hussey, A. M., Boone, G. M., 1985. Bedrock Geologic Map of Maine. Maine Geological Survey. Échelle 1 :500 000.

- Osberg, P. H., Tull, J. F., Robinson, P., Hon, R., Butler, J. R., 1989. The Acadian orogen. In: The Appalachian-Ouachita orogen in the United States, The Geology of North America, F-2 : 179-232.
- Ouellet, L., Rompré, M., Carrier, D., Laflamme, G., 1995. Étude pédologique du comté de Beauce [en ligne]. Rapport de recherche IRDA, n°PQ6, 82 pages. Disponible sur : <http://www.irda.qc.ca/fr/Etudes-pedologiques> (consulté le 11/06/2012).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 1633-1644.
- Petrelli, M., Poli, G., Perugini, D., Peccorillo, A., 2005. Petrograph : A new software to visualize, model and present geochemical data in igneous petrology. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 6.
- Piercey, S. J., 2011. Lithogeochemistry applied to tectonics and economic geology. Short course at Québec Exploration 2011 Congress.
- Pinet, N., et Tremblay, A., 1995. Tectonic evolution of the Quebec-Maine Appalachians: From oceanic spreading to obduction and collision in the northern Appalachians. *American Journal of Science*, 295 : 173–200.
- Raglan, P. C., 1989. Basic analytical petrology. Oxford, 368 p.
- Rankin, D. W., Coish, R. A., Tucker, R. D., Peng, Z. X., Wilson, S. A., Rouff, A.A., 2007. Silurian extension in the upper Connecticut Valley, United States and the origin of middle paleozoic basins in the Québec embayment. *American journal of Science*, 307 : 216-264.
- Richer-LaFlèche, M., 2010. Levé gravimétrique et magnétométrique du lac St-Jean. Les MINES J.A.G. Itée. 93 p.
- Richer-LaFlèche, M., 2011a. Levé de résistivité électrique et d'imagerie tomographique Terrameter-LS (ABEM), propriété Charlevoix. Les MINES J.A.G. Itée. Institut National de la Recherche Scientifique (centre Eau-Terre-Environnement). 56 p.
- Richer-LaFlèche, M., 2011b. Levé gravimétrique effectué dans la partie est de la propriété Témiscouata. Les MINES J.A.G. Itée. Institut National de la Recherche Scientifique (centre Eau-Terre-Environnement). 49 p.

- Roser, B. P. et Korsch, R. J., 1986. Determination of tectonic setting sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94 (5) : 635–650.
- Roser, B. P. et Korsch R. T., 1988. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94 : 635-650.
- Rudnick, R. L., et Gao, S., 2003, in Holland, H.D., et Turekian, K.K., eds., *Treatise on Geochemistry*: Oxford, UK, Elsevier, 3 : 1–64.
- Sagax Geophysique Inc., 1984. Étude géophysique de la propriété minière de Saint-Robert (Beauce). 20 p. Réf : Sagax 84108-B. Rapport inédit.
- Segerstrom, K., et Young, E. J., 1972. General geology of the Hahns Peak and Farwell Mountain quadrangles, Routt County, Colorado: U.S. Geological Survey Bulletin 1349.
- Sheriff, R. E. et Geldart, L. P., 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, Second Edition. 628 p.
- Simonetti, A. et Doig, R., 1990. U-Pb and Rb-Sr geochronology of Acadian plutonism in the Dunnage zone of the southeastern Quebec Appalachians. *Revue canadienne des Sciences de la Terre*, 27 : 881-892.
- Slivitzky, A. et St-Julien, P., 1987. Compilation géologique de l'Estrie-Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MM 85-04, 40 p.
- Spencer, C., Green, A., Morel-a-l'Huissier, P., Milkereit, B., Luetgert, J., Stewart, D. S., Unger, J. D., Phillips, J. D., 1989. Allochthonous units in the northern Appalachians: Results from the Quebec-Maine seismic reflection and refraction surveys *Tectonics*, in press.
- Stewart, D. B., Unger, J. D., Phillips, J. D., Goldsmith, R., Poole, W. H., Spencer C. P., Green, A. G., Loiselle, M. C., St. Julien, P., 1986. The Quebec-Western Maine seismic reflection profile: Setting and first year results. In M. Barazangi and L.D. Brown, Eds., *Reflection seismology: The continental crust*. American Geophysical Union Geodynamics Series, 14 : 189-199.
- Stewart, H. J., McLeod, M. J., Thorne, K. G. 2011. *Tungsten*. New Brunswick Department of Natural Resources; Lands, Minerals and Petroleum Division, Mineral Commodity Profile No. 7, 7 p.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, 12 : 1-33.

- Sun, S. S. et McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. Eds. *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society London Special Publications : 313–345.
- Tang J., Köhler, S. J., Dietzel, M., 2008. $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ and $^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ fractionation during inorganic calcite formation: I. Sr incorporation. *Geochemistry and Cosmochemistry Acta*, 72 : 3718-3732.
- Tikhonov, A. N., 1950. Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth's crust. *Doklady Akademii Nauk*, 73 : 295-297.
- Tremblay, A. et Pinet N., 1994. Distribution and characteristics of Taconian and Acadian deformation southern Québec Appalachians. *Geological Society of America Bulletin*, 106 : 1171-1181.
- Tremblay, A., et Pinet, N., 2005. Diachronous supracrustal extension in an intraplate setting and the origin of the Connecticut Valley-Gaspé and Merrimack troughs, northern Appalachians. *Geological Magazine*, 142 : 7–22.
- Tremblay, A. et St-Julien, P., 1990. Structural style and evolution of a segment of the Dunnage Zone from the Quebec Appalachians and its tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 102 : 1218-1229.
- Tremblay, A., Lebel, D., Van Grootel, G., 1993. Stratigraphy and structure of the Connecticut Valley-Gaspé trough in southern Quebec. *Geological Society of America, Northeastern Section annual meeting, Abstracts with programs*, 25 : p. 84.
- Tremblay, A., St-Julien, P., Labbé, J. Y., 1989. Mise à l'évidence et cinématique de la faille de la Guadeloupe, Appalaches du sud du Québec. *Revue canadienne des Sciences de la Terre*, 26 : 1932-1943.
- Tremblay, A., Malo, M., St-Julien, P., 1994. Dunnage Zone-Quebec. In *Geology of the Appalachian-Caledonian Orogen in Canada and Greenland: Decade of North American Geology*, volume F-1, édité par H. Williams, in press, Geological Survey of Canada, Ottawa.
- Tukey J. W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, London.

- UBC Geophysical inversion facility, 2007. Inversion for Applied Geophysics. Disponible sur <http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/index.htm> (consulté le 25/08/2012).
- Van Grootel, G., Tremblay, A., Soufiane, A., Achab, A., Marquis, R., 1995. Analyse micropaléontologique du synclinorium de Connecticut Valley – Gaspé dans le sud du Québec: Étude préliminaire. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, MB 95-26.
- Waldron, J. W. F. et Van Staal, C. R., 2001. Taconian orogeny and the accretion of the Dashwoods block: a peri-Laurentian microcontinent in the Iapetus ocean. *Geology*, 29 : 811–14
- Walker, T. L., 1913. Rapport sur les minerais de tungstène du Canada. Ministère des Mines du Canada, rapport 156, 56 p.
- Zen, E.- A., 1983. Exotic terranes in the New England Appalachians - limits, candidates, and ages: A speculative essay. Dans *Contribution to the tectonics and geophysics of mountain chains*, Geological Society of America Memoir, 158. Edited by R.D. Hatcher, H. Williams and I. Zietz., 55-81.