
Reconnaissance des structures synvolcaniques fertiles pour les minéralisations de sulfures massifs volcanogènes (Cu-Zn) dans le Groupe de Blake River, Abitibi

PROJET 2007-03

PAR : STÉPHANE FAURE, GÉO. PH. D.

JUIN 2009



AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

Faure, S. 2008. Reconnaissance des structures synvolcaniques fertiles pour les minéralisations de sulfures massifs volcanogènes (Cu-Zn) dans le Groupe de Blake River, Abitibi. Rapport du projet CONSOREM 2007-03, 48 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web : www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Des relations spatiales ont été établies entre des structures synvolcaniques (failles et dykes mafiques) et des minéralisations et altérations de type sulfures volcanogènes (SMV) dans la Caldeira archéenne de Misema, Groupe de Blake River (GBR), Sous-Province de l'Abitibi. Ce rapport est divisé en trois parties et traite : 1) des relations spatiales entre les mines de SMV et les complexes de dykes mafiques et les failles synvolcaniques connues ; 2) d'une méthode de reconnaissance de failles par la rupture de la maille de direction et de pendage de la stratigraphie volcanique (S0) ; et 3) de la reconnaissance de structures synvolcaniques (dykes et failles) fertiles par une approche géochimique.

Trois principaux réseaux de dykes spatialement organisés ont été identifiés dans le complexe de dykes mafiques du Blake River, il s'agit : 1) du réseau annulaire et périphérique de dykes en feuillets minces, allongés et sub-parallèles à S0 ; 2) du réseau de dykes associés à des centres volcaniques et des caldeiras sommitales ; et 3) de la superstructure du Horseshoe et de son complexe de dykes en éventails associés qui produit une importante anomalie magnétique et gravimétrique. Les mines sont spatialement associées aux systèmes 1 et 3.

Les failles connues du GBR, côté québécois, ont fait l'objet d'une analyse comparative avec les réseaux de failles du sud de la Province du Lac Supérieur. La majorité des failles des familles N050-N090 et N090-N135 sont interprétées comme étant des structures synvolcaniques parce qu'il n'y a pas d'extension ou de parallèle à l'extérieur de l'enceinte de la Caldeira Misema. La famille N050-090 est unique au Camp Central et n'est présente ailleurs en Abitibi que dans la région de Chibougamau. La majorité des autres failles sont à fort angle par rapport au grain structural de l'Abitibi et sont corrélées à différents événements tectoniques de nature fragile qui ont évolué depuis le début du Protérozoïque.

Une nouvelle méthode de reconnaissance de failles a été développée. L'approche est basée sur la rupture des surfaces d'interpolation générées à partir des données localisées de stratification S0. L'approche consiste à repérer des ruptures nettes dans les mailles de direction et de pendage. La méthode a permis de mettre en évidence 153 nouvelles failles ou prolongements de failles, principalement localisées dans la partie ouest du GBR et au sud de la faille interne de Misema (secteur sous représenté en terme de nombre de failles connues). De plus, 96 prolongements de failles ont été interprétés principalement à partir des données d'élévation, pour un grand total de 249 nouvelles failles. Dans l'ensemble, les directions de ces nouvelles failles sont très similaires à l'orientation des principales familles de failles connues. La densité et la distribution de ces nouvelles failles, principalement dans la partie ouest du GBR, sont comparables à celles des failles du côté ontarien. Cette cohérence indique que les failles interprétées par la méthode des mailles de S0 ont une signification géologique réelle.

Une banque unique contenant 830 failles connues et interprétées a été construite en considérant la proximité de ces failles avec 22 critères d'altérations géochimiques et minéraux normatifs d'altérations, ou critères de minéralisations. Une analyse en composantes principales (ACP) sur les failles connues ayant au moins deux types d'altérations a permis d'isoler des assemblages d'altérations lithogéochimiques fertiles de type volcanogène. Il s'agit de failles associées aux mines et à des lentilles de SMV (≤ 400 m), à des zones de sulfures, à des indices de cuivre, et/ou localisées à proximité de dykes mafiques (≤ 200 m) et qui ont des altérations de type Ishikawa + Pyrophyllite et/ou Spitz-Darling. Ces critères de fertilité ont été par la suite reconnus tant pour les failles connues que nouvellement interprétées. La distribution en carte de ces failles fertiles montre que seuls les systèmes hydrothermaux reliés aux caldeiras de New Senator et de Noranda sont fertiles. Cependant, les failles les plus fertiles se limitent au Camp Central et sont associées au système synvolcanique N070 et aux failles Despina et McDougall. La distribution spatiale des failles non fertiles confirme l'interprétation que la majorité des failles à fort angle (familles NE et NO) par rapport au grain structural du sud de l'Abitibi (E-O) et recoupant les roches sédimentaires du Protérozoïque sont des structures tardives et cassantes stériles.

TABLE DES MATIERES

Avertissement	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
1 Introduction.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Géologie.....	1
1.4 Caractéristiques de failles synvolcaniques archéennes dans le Camp Central et leur relation avec les minéralisations et les dykes mafiques et intermédiaires	2
1.4.1 Fluides hydrothermaux dans les failles synvolcaniques	4
1.4.2 Altérations dans les failles synvolcaniques du Camp Central	6
2 Relation spatiale entre les mines de sulfures massifs volcanogènes et les complexes de dykes mafiques à intermédiaires et les failles synvolcaniques du GBR	7
2.1 Relation entre mines de SMV et dykes intermédiaires à mafiques dans le GBR	7
2.1.1 Complexe de dykes annulaires d'échelle plurikilométrique	7
2.1.2 Complexes de dykes annulaires d'échelle kilométrique	8
2.1.3 Le dyke Horseshoe et son cortège de dykes en éventail	8
2.2 Relation spatiale entre mines de SMV et failles connues dans le Camp Central.....	9
2.3 Corrélation régionale et âges de familles de failles connues dans le GBR	9
3 Méthode de reconnaissance des failles par la rupture de la maille de direction et de pendage de la stratigraphie volcanique.....	11
3.1 État actuel sur la connaissance des failles	11
3.2 Nouvelle méthode d'identification de failles	11
3.2.1 Linéaments topographiques	11
3.2.2 Base de données	12
3.2.3 Résultats.....	12
3.3 Sommaire	14
4 Reconnaissance de structures synvolcaniques (dykes et failles) fertiles dans le Groupe de Blake River : une approche géochimique.....	15
4.1 Introduction	15
4.2 Données utilisées	15
4.3 Indicateurs de fertilité	15
4.4 Relation spatiale entre altérations et dykes mafiques	17
4.5 Relation spatiale entre altérations et failles.....	17
4.5.1 Méthode.....	17
4.6 Analyse en composantes principales (ACP)	18
4.7 Résultats	19
4.7.1 Failles stériles connues et nouvellement interprétées	20
4.7.2 Failles fertiles connues et nouvellement interprétées	21
4.8 Sommaire	22
5 Conclusions.....	22
Références.....	24
Cahier de figures.....	27

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Localisation du Groupe de Blake River dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi.....	27
Figure 2 :	Principaux éléments de la Caldeira de Misema et failles majeures associées aux caldeiras Misema, New Senator et Noranda.	27
Figure 3 :	Localisation des failles synvolcaniques Despina et McDougall.....	28
Figure 4 :	Complexe de dykes synvolcaniques de composition mafique à intermédiaire de la Caldeira Misema	28
Figure 5 :	Réseau de dykes annulaires et précoces de la Caldeira de Misema en relation avec les principales failles.....	29
Figure 6 :	Réseaux de dykes concentriques interprétés comme des centres volcaniques	29
Figure 7 :	A) Structure du Horseshoe et cortège de dykes associés B) Anomalie magnétique	30
Figure 8 :	Test statistique montrant la réelle organisation des mines par rapport à la distance aux failles dans le Camp Central	31
Figure 9 :	Les différentes familles de failles recoupant le groupe de Blake River	32
Figure 10 :	Partie centrale de la compilation des 5708 données de direction de S0 et des directions de 1585 conducteurs EM formationnels, dans le Groupe de Blake River.....	32
Figure 11 :	Partie centrale de la compilation des 1909 données de pendages de S0 dans le Groupe de Blake River.....	33
Figure 12 :	Directions de S0 et de conducteurs électromagnétiques de la figure 10 maillées par la méthode des voisins naturels avec les principales failles dans le centre du Groupe de Blake River, côté Québec.	33
Figure 13 :	Pendages de S0 maillés par la méthode des voisins naturels avec les principales failles dans le centre du Groupe de Blake River.....	34
Figure 14 :	Complexe intrusif du Horseshoe et principales ruptures dans la maille des directions de S0.....	34
Figure 15 :	Complexe intrusif du Horseshoe et principales ruptures dans la maille de pendage de S0 aux extrémités de dykes mafiques et intermédiaires	35
Figure 16 :	Synthèse des dykes qui montrent des ruptures significatives dans la maille de direction et/ou de pendage de S0 et qui sont considérés comme des failles synvolcaniques.....	35
Figure 17 :	Les 57 prolongements de failles interprétés sur la rupture de la maille des directions de S0 et les failles connues	36
Figure 18 :	Les 13 prolongements de failles interprétés sur la rupture de maille des pendages de S0 et les failles connues	36
Figure 19 :	Les 68 nouvelles failles interprétées sur la rupture de la maille des directions de S0	37
Figure 20 :	Les 13 nouvelles failles interprétées sur la rupture de maille des pendages de S0.....	37
Figure 21 :	Carte synthèse montrant les 153 nouvelles failles interprétées à partir des mailles des directions et des pendages de S0	38
Figure 22 :	Les 81 prolongements de failles connues déduits à partir d'un modèle numérique d'élévation de terrain de la compagnie Xstrata Copper.....	38
Figure 23 :	Carte synthèse montrant le bilan des nouvelles failles et des prolongements de failles dans la partie québécoise du Blake River	39
Figure 24 :	Distribution dans le Groupe de Blake River des 28 757 échantillons géochimiques utilisés pour déterminer la fertilité des altérations en bordure des failles.	39
Figure 25 :	Boîtes à moustaches montrant les variations des valeurs médianes d'indices et de minéraux normatifs (*NORMAT) et d'indices géochimiques calculés pour des groupes de roches rhyolitiques et andésitiques.....	40
Figure 26 :	Cartes maillées dans le Blake River Ouest de l'altération en epidote normative (calcul NORMAT) avec la position des rhyolites V1 et des andésites V2 avant (A) et après (B) la normalisation des données par rapport aux lithologies V1 et V2.....	40
Figure 27 :	Maille de l'indice d'altération IPARA et dykes corrélés au réseau annulaire de Misema, au réseau NO-SE de New Senator et au bloc Horne.	41
Figure 28 :	Maille de l'indice d'altération IFRAIS.	41

Figure 29 : Maille de l'indice séricite ($K_2O/(K_2O + Na_2O)$) normalisé sur 100 avec légende en relation spatiale avec le complexe de dykes du Horseshoe, le Dyke Dufresnoy et les dykes des failles Despina-McDougall	42
Figure 30 : Exemple d'une analyse spatiale radiale de l'altération en bordure d'une faille au Sud de Rouyn-Noranda avec la position des échantillons géochimiques	42
Figure 31 : Exemples de failles avec lien spatial positif ou négatif à l'indice de saturation en carbonates ($CO_2/CaO+FeO+MgO+MnO$) près des mines SMV de Rouyn-Noranda.....	43
Figure 32 : Les quatre cas considérés de manière schématique montrant une relation spatiale positive entre une faille et une zone d'altération.....	43
Figure 33 : Diagramme de contributions des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales (ACP) expliquant le maximum de variation dans la base de données des failles connues et ayant au moins deux types d'altération.....	44
Figure 34 : A) Diagrammes de contributions de la première composante principale de l'ACP (PC1) versus la troisième (PC3), et B) de PC1 versus la quatrième composante (PC4) et les principaux assemblages d'altération pour les failles connues et ayant au moins deux types d'altération.	44
Figure 35 : Graphiques montrant les pourcentages de failles situées à $\leq 400m$ de gisements de SMV et à $\leq 200m$ de dykes mafiques à intermédiaires en fonction du nombre d'altérations reconnues en bordure des failles connues et des nouvelles failles (et prolongements de failles) stériles ou fertiles.....	45
Figure 36 : Distribution des 662 failles considérées stériles sur une base géochimique ou n'ayant aucune information lithogéochimique.	46
Figure 37 : Distribution des 168 failles considérées fertiles et qui montrent des relations spatiales positives avec les indicateurs d'altération Ishikawa, pyrophyllite ou Spitz-Darling	46
Figure 38 : Distribution des 52 failles considérées les plus fertiles et répondant au critère suivant : Ishikawa + pyrophyllite ou Ishikawa + Spitz-Darling ou Spitz-Darling + pyrophyllite.	47
Figure 39 : Détails des failles les plus fertiles en relation spatiale avec les mines de SMV, les indices de métaux de base et de cuivre et autres failles considérées stériles ou moins fertiles.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tonnage et teneurs des mines de SMV dans le Groupe de Blake River	3
Tableau 2 : Altérations et diamètres des halos lithogéochimiques projetés autour des mines du GBR	5
Tableau 3 : Indicateurs de fertilité (indicateurs d'altération, de minéralisation et de favorabilité pour les SMV) documentés autour des failles	16
Tableau 4 : Résumé statistique sur l'altération des failles.....	20

1 INTRODUCTION

Ce rapport traite de la reconnaissance de la fertilité des structures synvolcaniques sous-marines (failles et dykes mafiques) dans l'empilement de roches volcaniques du Groupe de Blake River (GBR), situé dans le sud de la ceinture archéenne de roches vertes de l'Abitibi ([Figure 1](#)). La première partie montre des relations spatiales qui existent entre les mines de sulfures massifs volcanogènes (SMV) et des complexes de dykes mafiques du GBR, de même que des failles synvolcaniques du Camp Central dans la région de Rouyn-Noranda. La seconde partie présente une nouvelle méthode de reconnaissance de failles par la rupture de la maille de direction et de pendage de la stratification (S0). La troisième partie concerne la reconnaissance des structures synvolcaniques fertiles pour les minéralisations de type SMV par une approche lithogéochimique de l'altération volcanogène.

1.1 Problématique

Les failles synvolcaniques sont réputées être les hôtes de la majorité des gisements de SMV archéens dans le monde (Franklin et al. 1981; Gibson et Watkinson, 1990; Franklin et al. 2005). Toutefois, parmi une multitude de failles d'une région donnée, seule une minorité de structures sont fertiles et contiennent des minéralisations économiques ; les autres étant peu, ou non fertiles, ou postérieures au volcanisme, ou encore post-tectoniques. Les fractures synvolcaniques se traduisent également par la présence de dykes synvolcaniques. La reconnaissance de ces dykes, ainsi que des différentes familles et générations d'essaims de dykes, qui ont une relation spatiale avec les minéralisations de type SMV est donc très importante pour les stratégies d'exploration dans les camps matures.

Dans le Camp Central de Rouyn-Noranda, un des guides les plus recherchés pour l'exploration des SMV est la présence de failles synvolcaniques. Cependant, bien que la relation spatiale entre les failles et les mines soit un paramètre connu, cette relation n'a pas clairement été démontrée statistiquement. De plus, comme certaines failles connues sont réputées être fertiles, est-il possible de proposer ou de reconnaître des extensions à ces failles ? Finalement, si l'on considère qu'il existe une réelle corrélation entre la possibilité de trouver un gisement en s'approchant d'une faille synvolcanique, la difficulté est d'identifier de nouvelles failles (nouvelles cibles d'exploration) dans un camp mature et dans un territoire qui a été cartographié à différentes époques et à différentes échelles.

1.2 Objectifs

Un des objectifs de l'étude est de démontrer la relation de proximité entre des gisements de SMV et certaines familles de dykes mafiques et de failles dans le GBR. Un autre objectif est de développer une méthode pour identifier des prolongements de failles connues, ou d'identifier de nouvelles failles. Le but de ce travail est de reconnaître, en utilisant les données lithogéochimiques, les failles les plus fertiles du point de vue de l'altération de type SMV et de reconnaître les dykes mafiques qui sont associés à des failles synvolcaniques.

1.3 Géologie

Le GBR est défini comme une mégacaldeira sous-marine (Pearson et Daigneault, 2009) dont les principales caractéristiques sont les suivantes : disposition radiale et concentrique des dykes synvolcaniques mafiques et intermédiaires, géométrie en dôme des strates volcaniques et des failles synvolcaniques annulaires internes et externes entre lesquelles sont distribués des complexes de roches volcanoclastiques ainsi qu'une altération régionale en carbonates. La superstructure est formée d'au moins trois caldeiras imbriquées et distinctes ([Figure 2](#)). La plus ancienne, Misema, forme une plaine sous-marine de basaltes tholéitiques et représente le substratum de la plus grande caldeira archéenne au monde (80 km de diamètre). La caldeira de New Senator est une structure en forme de graben mesurant

35 km x 14 km et orientée NO-SE qui s'est développée au centre de Misema suite à une série de résurgences causées par une ou plusieurs chambres magmatiques superficielles qui ont migré vers le SE pour culminer avec la mise en place des plutons de Flavrian et de Powell ([Figure 2](#)). La Caldeira de Noranda correspond à l'effondrement final du système volcanique. Cet événement produit une structure en graben orientée N070 qui est délimitée par les failles Horne Creek et Hunter Creek. Dans le GBR, la majorité des gisements de sulfures massifs sont localisés dans le Camp Central et sont intimement reliés à l'évolution de cette caldeira.

1.4 Caractéristiques de failles synvolcaniques archéennes dans le Camp Central et leur relation avec les minéralisations et les dykes mafiques et intermédiaires

Sur le terrain, les failles synvolcaniques affleurent exceptionnellement. Par exemple, elles sont communément interprétées entre les affleurements dans les creux topographiques et les ruisseaux dans la cartographie au 1:2500 de Gibson (1983). Plusieurs critères de reconnaissance de failles synvolcaniques sont présentés par Gibson et al. (1997), notamment :

- L'intensification, la discordance, et les changements abrupts de l'altération hydrothermale ;
- Les changements abrupts d'épaisseur suivant les unités volcaniques ou arrêts nets d'unités ;
- La présence de brèches volcaniques grossières, localisées et localement discordantes aux unités (Franklin, 1993); de roches fragmentaires, « foliées » ou schisteuses ; et des veines de quartz, des stockwerks et des filonets de sulfures ;
- L'alignement de dômes rhyolitiques (Dimroth et al. 1978);
- Des unités non-faillées recouvrant des séquences faillées ;
- Des réseaux de dykes ou apophyses liés à des intrusions synvolcaniques ;
- Des changements ou des ruptures de direction et/ou de pendage d'unités volcaniques.

Dans le GBR, la grande majorité des failles ont un pendage fort, généralement supérieur à 70°, particulièrement dans le Camp Central (Gibson 1983 ; Gibson et Watkinson 1993) et ce quelque soit le pendage des couches volcaniques. Cette relation de pendage entre les failles et les couches signifie soit que les failles ont été actives au cours du volcanisme et localement lors de la tectonique souple et qu'elles ont conservé leur attitude et leur composante planaire lors de la déformation progressive, soit qu'elles représentent des éléments structuraux nettement tardifs reliés à de la déformation fragile dans la partie superficielle de la croûte (1-3 km de profondeur).

Les deux exemples les plus éloquents de failles synvolcaniques génétiquement associées à des minéralisations et des altérations de type volcanogène dans le Camp Central sont 1) les failles Despina et McDougall et 2) la faille Quesabe.

Les failles Despina et McDougall, deux failles synvolcaniques jumelles et rapprochées, sont les failles les mieux documentées en Abitibi, et probablement de toutes les ceintures de roches vertes archéennes (Setterfield, 1987 ; Gibson et al., 1993 ; Setterfield et al. 1995). Ces failles tabulaires ont été actives lors de la subsidence de la Caldeira de Noranda, et possiblement avant selon Pearson et Daigneault 2009, et contrôlent la mise en place du gisement de Corbet (2,7 Mt @ 2,9% Cu; **Tableau 1**), de trois lentilles sub-économiques de SMV et de nombreux indices. Elles sont orientées NO-SE, se suivent parallèlement sur plus de 3 km avec des épaisseurs variant entre 0,1 et 100 m ([Figure 3](#)). La Faille Despina est subverticale alors que la Faille McDougall a un pendage de 70° vers l'ouest. Les failles se rejoignent à environ 900 m de profondeur où est localisé le gisement de Corbet. La Faille Despina est connectée en

profondeur au Pluton de Flavrian (Setterfield et al. 1995). Les rejets verticaux sont estimés à 370 m et 600 m respectivement pour les failles Despina et McDougall, et seul un déplacement horizontal de 260 m est calculé sur la faille McDougall (Setterfield et al. 1995). Les failles sont composées d'injections de dykes massifs (éponges rubanées) ou de brèches polymictiques de composition rhyodacitique, dioritique, ou andésitique (Setterfield, 1987). Les failles ont servi de conduits d'alimentation pour les laves rhyodacitiques non explosives des unités sus-jacentes. Les différentes lentilles de SMV sont localisées à l'intersection des deux failles et du réseau de failles synvolcaniques du Camp Central orienté N070.

L'autre faille dont le lien génétique avec des gisements de SMV est clairement établi est la Faille Quesabe. Celle-ci est caractérisée par un complexe de dykes mafiques parallèles reliant les mines Old Waite et Norbec (**Tableau 1**) et deux autres gisements sub-économiques (Cousineau 1980 ; Cousineau et Dimroth, 1982 ; Gibson et Watkinson, 1990 ; Gibson et al. 1997). Il s'agit d'un corridor de dykes et d'altération d'une largeur de près de 800 m par plus de 6 km de long qui matérialisent un graben synvolcanique.

En résumé, ces deux exemples représentatifs du Camp Central montrent que les dykes sont intimement liés à des failles actives et fertiles. De façon générale, la majorité des failles synvolcaniques contiennent des dykes et plusieurs dykes cartographiés sont en fait des failles, c'est-à-dire qu'il y a eu mouvement peu avant, pendant, ou peu après l'activité volcanique. Ces dykes sont très nombreux (Pearson et Daigneault, 2009), mais souvent difficiles à identifier sur l'affleurement ou en forage, parce qu'ils sont minces et que leurs composition et texture massive sont similaires à celles des roches extrusives.

Tableau 1 : Tonnage et teneurs des mines de SMV dans le Groupe de Blake River¹

Gisements	Mt	Cu (%)	Zn (%)	Au (Oz/t)	Distance (m) ²	Longueur de la faille hôte (km)	Intersection ³ de failles
Horne (Zones H, G et E)	54.0	2.20	-	0.18	< 300	> 10	oui
Quémont	15.0	1.22	1.89	0.13	< 250	> 20	oui
Bouchard-Hébert ⁴ (lentille 1100)	10.7	0.77	4.54	0.04	-	-	non
Amulet (Lower A)	5,2	5.10	5.20	0.04	< 250	4	oui
Norbec	4.6	2.61	3.88	0.02	< 100	9	oui
Millenbach	3.9	3.46	4.33	0.03	< 100	4.5	non
Gallen	3.3	0.07	4.77	0.02	-	-	non
Corbet	3.1	2.90	1.96	0.03	< 200	4	oui
East Waite	1.7	4.10	3.25	0.05	100	9	oui
Joliet	1.6	0.75	-	-	-	-	-
Ansil	1.4	7.18	0.80	0.06	< 100	1.5	non
Old Waite	1.2	4.70	2.98	0.03	< 100	9	non
New InscO (Baie Fabie)	1.7	2.11	-	0.03	275	> 20	oui
Delbridge	0.04	0.55	8.60	0.07	< 150	0.5	oui

¹ Données d'après Gibson et Watkinson (1990).

² Distance de la lentille projetée à la surface par rapport à la plus proche faille hôte.

³ À moins de 500m d'une intersection de failles synvolcaniques.

⁴ Données de Breakwater Resources (2008).

1.4.1 Fluides hydrothermaux dans les failles synvolcaniques

Les périodes de minéralisation et d'altération associées aux caldeiras coïncident avec l'affaissement de la caldeira, c'est-à-dire lors de la vidange de la chambre magmatique (Gibson et Watkinson, 1990; Guillou-Frottier et al. 2000). Cela se traduit par une recrudescence du volcanisme, des injections de magma (dykes) au-dessus et en périphérie de la chambre magmatique et par conséquent, d'un flux thermique et hydrothermal beaucoup plus important, soutenu, et rigoureux.

La zone de réaction des fluides métallifères avec les roches volcaniques adjacentes se limite principalement à des zones de décharge (cheminées) retrouvées ponctuellement le long des structures volcaniques (Franklin, 1993). Les modèles thermodynamiques 2D de la circulation des fluides dans un plan de faille indiquent que la propagation de la chaleur et des fluides se concentre verticalement et ponctuellement à intervalles réguliers (Yang et Radulescu 2006). L'espacement entre ces zones d'advection est guidé par la dimension des cellules convectives dans le plan de faille. Par exemple, dans le Camp Central, la continuité verticale moyenne des cheminées d'altération sous les amas de sulfures massifs est d'environ 1 km, ce qui est une estimation probable de la dimension des paléo-cellules hydrothermale (Gibson et Watkinson 1990). Les modèles numériques 3D qu'en à eux montrent que les panaches de fluides hydrothermaux se forment aux intersections de failles (Yang, 2006). En effet dans le Camp Central, la majorité des gisements sont localisés aux intersections de failles (Gibson et Watkinson, 1990).

Il est généralement admis que la dimension moyenne des halos d'altération autour des lentilles SMV est d'environ 1,5 à 2 fois la dimension du gisement. Par exemple, la dimension qu'occupent les altérations en silice, chlorite, séricite, épidote et quartz autour du gisement Amulet (F shaft) est deux fois celle de la lentille de SMV (Santaguida et al. 2002), alors que le halo de chlorite et séricite (silice) autour du gisement d'Ansil a une dimension équivalente à celle de la lentille de sulfures massifs (Riverin, 1989; Galley et al., 2000). Le **tableau 2** résume la nature de plusieurs altérations et la dimension des halos d'altération géochimique correspondant pour plusieurs mines dans le Camp Central. Les halos d'altération géochimique projetés à la surface varient en plan entre 250 et 700m de diamètre autour, ou au-dessus du gisement, avec une moyenne de 450m. Le rapport entre la dimension du halo d'altération et celui de la lentille varie entre 1 et 4 pour une moyenne de 2. Cette dimension moyenne reflète principalement la perméabilité de milieu volcanique et témoigne du fait que la majorité des lentilles dans le Camp Central sont encaissées dans des coulées massives. Par contre, dans les roches bréchiques (volcanoclastites) comme dans l'environnement immédiat de l'ancienne mine Corbet, le halo d'altération atteint 6 fois la dimension des lentilles en plan, ce qui représente une cible d'exploration de près de 2 km (Gibson et al. 1993).

Tableau 2 : Altérations et diamètres des halos lithogéochimiques* projetés autour des mines du GBR

Mines	Cu (t)	Dimensions lentille			SF [†]	CHL	CHL fer [‡]	EP [‡]	SER [‡]	Pyro [‡]	Ishi-kawa	IFrais [‡]	IPara [‡]	ISER [‡]	IPAF [‡]	Halo	Ratio
	Équi-valent	Long. (m)	Larg. (m)	Aire (km ²)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Halo (m)	Moyenne	Lentille / halo
Horne	1192295	900	450	0.150		300	350			300	300			300		300	1
B-Hébert	572360	400	100	0.018	500										400	450	1
Quemont	520608	450	150	0.050													
Waite-Amulet C A	444167	250	250	0.016													
Norbec	280662	250	150	0.032	650		300	550								500	2
Millenbach	267679	425	200	0.033	600											600	2
Magusi	175565	150	100		400											400	3
Gallen	126301	300	125	0.022	400			550								550	2
East Waite	125756	275	75	0.015		650	700		700	650	600	450	700	650	600	600	2
Aldermac	120007	175	75	0.009	350	500			450		400			400	500	450	3
Ansil	109926	375	200	0.044		850	500		500	500	500	650	350			550	2
Old Waite	86741	150	125	0.015				900					650			650	4
Don Rouyn	61769																
Corbet	55597	400	125	0.037													
Delbridge	38016	200	50	0.005	600		350	800		850			850			700	3
Waite-Amulet F	23470	125	50	0.006													
Joliet	20800						900				400	650				500	
New Insc0	18412	100	40	0.003	350		300			150		150			200	200	2
Vauze	16205	125	100	0.009		300					250	150				250	2
Dufault 1	8400	125	60	0.006		500										500	4
Bedford Hill	3321				250											250	
Halliwell	3077				150											150	
South Dufault	2333				200				100			450	200			300	
Despina	2172											700				700	
Inmont	2062				200	400	500	300	400	350	600	400	500	400	400	400	
Bloc 169	1918	60	30	0.001							550					550	
Newbec	20													700		700	

* La dimension des halos lithogéochimiques est mesurée à partir du centre du gisement.

† SF = Sulfures; CHL = Chlorite; CHL fer = Chlorite ferrière; EP=Épidote; SER = Séricite; Pyro = Pyrophyllite

‡ Indices calculé avec NORMAT (Piché et Jébrak, 2004)

1.4.2 Altérations dans les failles synvolcaniques du Camp Central

L'altération volcanogène dans le Camp Central se présente sous forme concordante ou perpendiculaire à la séquence stratigraphique (Gibson, 1989 ; Gibson et Watkinson, 1990 ; Galley, 1993 ; Santaguida et al. 2002). L'altération concordante dans les andésites consiste en une altération modérée à forte en épidote et quartz et se retrouve sur au moins 3 niveaux stratigraphiques, soit les andésites de Flavrian, de Rusty Ridge et d'Amulet. Un niveau de silicification (silica cap) est présent et correspond à la rhyolite supérieure de la Formation d'Amulet.

L'altération discordante est soit distale ou proximale. L'altération discordante distale est caractérisée par une augmentation de quelques pourcentages de l'assemblage épidote-quartz le long de failles synvolcaniques (Santaguida et al. 2002). Dans certains cas, des épidosites sont documentées sous certains gisements. La Faille Quesabe est un bon exemple où l'altération est modérée à forte et se trouve sous forme de taches disséminées et de nodules d'épidote (Santaguida et al. 2002). L'altération discordante proximale des gisements du Camp Central consiste en une cheminée d'altération chloriteuse entourée d'une altération en séricite (Franklin, 1993). La faille McDougall en est un bon exemple. Setterfield et al. (1995) ont documenté l'altération hydrothermale et ont remarqué sur les quinze (15) premiers mètres en s'approchant de cette faille, une augmentation progressive de la chlorite, du quartz et de la séricite, et une diminution des carbonates et de la texture primaire des lattes de plagioclases. Ces changements minéralogiques et texturaux se traduisent en lithogéochimie par un appauvrissement en CaO et Na₂O et un enrichissement en MgO, K₂O, Fe₂O₃, et MnO comparativement aux coulées les plus fraîches (Setterfield et al. 1995).

Dans les quelques failles synvolcaniques non minéralisées du Camp Central qui affleurent en surface, la séricitisation domine dans les rhyolites et la chloritisation dans les roches volcaniques intermédiaires à mafiques (Gibson, 1983). Plusieurs des failles orientées N070 et failles secondaires de la Caldeira de Noranda contiennent des dykes (mafiques ou felsiques). Ces failles sont communément chloritisées et il est probable que cette altération soit le simple résultat de la déformation de dykes intermédiaires ou mafiques.

2 RELATION SPATIALE ENTRE LES MINES DE SULFURES MASSIFS VOLCANOGÈNES ET LES COMPLEXES DE DYKES MAFIQUES À INTERMÉDIAIRES ET LES FAILLES SYNVOLCANIQUES DU GBR

2.1 Relation entre mines de SMV et dykes intermédiaires à mafiques dans le GBR

L'étude des relations spatiales entre les minéralisations SMV et les dykes intermédiaires et mafiques dans la partie québécoise du GBR est basée sur l'architecture des dykes ainsi reconnue et définie par Pearson (2006) et par Pearson et Daigneault (2009). Les travaux de Pearson ont permis de reconnaître la présence de structures annulaires, de centres volcaniques, de caldeiras sommitales, et un dyke d'envergure régionale, le Horseshoe, dont le nom vient de sa forme de fer à cheval (Figures 2 et 4). La majorité des dykes de ce complexe endogène se sont introduits le long de fractures synvolcaniques lors du développement de chambres magmatiques de la mégacaldeira de Misema.

L'interprétation de ce complexe de dykes est ici poussée plus loin et l'accent est mis sur les relations spatiales entre les principales familles de dykes et la position des mines de SMV (Figure 4). Le complexe a été subdivisé en trois principaux systèmes de dykes dont les dimensions, les orientations et l'agencement présentent une organisation cohérente et structurée (ratio largeur/longueur, forme circulaire, curvilinéaire, ou rectiligne des dykes, dykes groupés ou individuels) 1) le complexe de dykes annulaires d'échelle plurikilométrique et périphériques en feuillets minces sub-parallèles à la stratification (S0), 2) les complexes de dykes ovoïdes kilométriques et 3) le dyke Horseshoe et son cortège de dykes en éventail (Figure 5 à Figure 7).

2.1.1 Complexe de dykes annulaires d'échelle plurikilométrique

Un complexe de dykes annulaires d'échelle plurikilométrique a été reconnu par Pearson (2006) comme appartenant à la mégacaldeira de Misema qui correspond à la presque totalité de la superficie définie par le GBR. Les dykes sont principalement concentrés en périphérie entre les failles annulaires internes et externes. Ce complexe de dykes en forme de pelures d'oignon est formé d'étroites et longues intrusions curvilinéaires et parallèles aux couches volcaniques. Ces dykes sont corrélés à l'étape précoce de la formation de la caldeira de Misema. Le complexe gabbro-dioritique de Cléricky daté à $2702,9 \pm 4,1$ Ma (Mueller et al. 2007) est l'un des jalons géochronologiques faisant partie de cet événement magmatique.

Globalement, les dykes définissent la forme d'un ovoïde aplati à l'échelle du GBR. Toutefois, la distribution des dykes annulaires n'est pas parfaitement homogène. Au nord et au centre du GBR, les dykes se suivent en continu pour former la couronne nord. Par contre, les dykes situés au sud présentent une orientation dominante E-O parallèlement à la Faille Cadillac – Larder Lake. Ils sont plus minces et leur connectivité avec les dykes du nord est plus difficile à établir. Deux explications sont possibles. Il pourrait s'agir d'un système de dykes indépendants ou plus probablement de l'effet de la déformation régionale qui dans cette région, près de la Faille de Cadillac, est caractérisée par une empreinte ductile plus développée qu'ailleurs dans le GBR.

La Mine Bouchard-Hébert, de même que les gisements SMV de la rivière Magusi (réserves inférées de 1,23 Mt à 7.1% Zn, 0.4% Cu, et 1.9 g/t Au) et de New Insko (production de 103 000 t à 2.64% Cu dans les années 1970 et réserves inférées de 672 800 t à 2.77% Cu) sont situés respectivement sur les failles externes et internes de Misema et pourraient être associés à ce système magmatique et aux failles annulaires (Tableau 1 ; Figure 5). La majorité des mines du Camp Central sont localisées le long de deux corridors orientés NO-SE, soit l'un au niveau des failles Despina-McDougall et l'autre situé de 5 à 7 km à l'est du premier.

2.1.2 Complexes de dykes annulaires d'échelle kilométrique

Une deuxième organisation de dykes reconnue par Pearson (2006) concerne les complexes de dykes concentriques dont le diamètre varie entre 5 et 12 km. Au coeur des structures, les dykes sont trapus et de forme complexe (probablement dû à un effet de pendage des dykes), alors qu'à la périphérie ils sont minces, allongés et de forme concentrique ([Figure 6](#)). Ces structures sont interprétées comme des centres volcaniques localisés pouvant représenter l'expression érodée de caldeiras sommitales (Pearson et Daigneault, 2009).

Dans la partie interne de Misema, les centres volcaniques correspondent aux complexes de dykes de la Formation de Duprat-Montbray. Ils ont une forme arrondie et semblent peu affectés par la déformation. Par contre, entre les failles annulaires internes et externes, les centres volcaniques ont une allure elliptique et semblent affectés par un raccourcissement pouvant être relié à la déformation régionale (Pearson et Daigneault, 2009). Les centres volcaniques recourent ou réutilisent les dykes annulaires régionaux. En effet, certains dykes annulaires du premier système de dykes viennent se buter sur des centres volcaniques, par exemple celui du Pluton de Monsabrais ([Figure 6](#)), sans les traverser, indiquant que les dykes de centres volcaniques et de sommets de caldeiras se sont mis en place pendant ou après la première superstructure en pelures d'oignon. Les bordures d'autres centres volcaniques, comme ceux situés au nord et à l'ouest de l'ancienne mine Inmont, semblent emprunter des structures préexistantes au premier réseau de dykes.

2.1.3 Le dyke Horseshoe et son cortège de dykes en éventail

Le dyke Horseshoe est une superstructure arquée qui fait de 10 à 12 km de long par 7 km de large dans sa partie sommitale au nord-est ([Figure 7](#)). Le dyke gabbroïque qui compose la structure atteint une épaisseur de 1 km et totalise 25 km de long. La géométrie du Horseshoe est très similaire à celle reconnue dans plusieurs rifts océaniques intraplaques (Dieterich, 1988 ; Carracedo, 1994 ; Walker, 1999). Le point triple au NE de la structure ([Figure 4](#) et [Figure 7](#)) peut être interprété comme une mise en place sous un champ de contraintes dominé par une pression magmatique sous-jacente surpassant la pression lithostatique régionale (Smith, 1987 ; Ryan, 1988). À la différence de Pearson et Daigneault (2009), le Horseshoe n'est pas considéré comme une structure unique, mais ferait partie d'un complexe de dykes en éventail dont il est l'origine. En effet, un cortège de dykes assez dense est présent à la périphérie de l'apex sur plus d'une dizaine de kilomètres vers le NE ([Figure 7](#)). Le champ magnétique total (levé MEGATEM de Xstrata Copper) révèle une série de dykes satellites disposés perpendiculairement au dyke nourricier du Horseshoe. Selon ces données magnétiques, le complexe de dykes en éventail serait beaucoup plus important en profondeur si l'on compare la trace des dykes cartographiés en surface et celles des anomalies magnétiques linéaires ([Figure 7B](#)). Aucun dyke n'est présent à l'intérieur de l'enceinte du Horseshoe.

La diorite quartzifère de Méritens, une phase précoce du Pluton de Flavrian (Kennedy, 1984), et le pluton tonalitique de Powell pourraient être considérés comme faisant partie intégrante de la structure du Horseshoe, sur la base que leur allongement est compatible avec l'orientation de l'éventail. Si on considère que les tonalites de Méritens et de Powell se mettent en place lors de cet événement, alors l'éventail du Horseshoe deviendrait une structure précurseur de la Caldeira de Noranda.

De grands dykes orientés NNE, de plusieurs centaines de mètres de largeur et de 5 à 10 km de longueur, occupent la moitié nord du GBR ([Figure 7A](#)). Les dykes NNE le plus à l'est sont reliés spatialement et sous la forme d'anomalies magnétiques et gravimétriques au Horseshoe. Plus au nord et à l'ouest, les dykes NNE sont détachés et loin du Horseshoe. Les dykes NNE pourraient faire partie du complexe de dykes du Horseshoe, mais exprimeraient un état de contraintes différent.

2.2 Relation spatiale entre mines de SMV et failles connues dans le Camp Central

L'importance des failles de caldeira pour la formation des gisements de SMV est sans équivoque, qu'il s'agisse de failles circulaires d'effondrement ou de grandes failles de bordures de rifts ou de grabens (Dimroth et al. 1985 ; Franklin, 1993 ; Gibson et al. 1993). Le fichier de données publiques du SIGEOM (en date d'avril 2008) indique qu'il existe environ 505 failles de plus de 500m de longueur dans le GBR du côté québécois. Des 27 mines de SMV situées dans ce groupe, 26 sont situées à moins de 600 m de 88 failles, ce qui revient à dire que 5% des failles sont dans l'entourage immédiat d'au moins une mine (**Tableau 1**).

Existe-t-il une réelle association spatiale entre mines et failles connues ? Dans le Camp Central par exemple, cette relation de proximité n'a jamais été clairement établie statistiquement. Elle fera l'objet d'une démonstration ci-après. Le Camp Central est pris à titre d'exemple parce qu'il contient la majorité des gisements et que la position géographique des failles est précise (cartographie de détails de Gibson, 1983 ; travaux historiques ; sondages de compagnies ; études thématiques du ministère ; etc.). La distribution statistique réelle des gisements par rapport à la population de failles de plus de 500 m de longueur a été comparée à une distribution aléatoire de gisements virtuels (**Figure 8**). Ce qui est comparé dans les deux cas sur un graphique c'est le pourcentage de gisements cumulés à l'intérieur de zones tampons (un pas de 200 m de largeur) en fonction du pourcentage de l'aire totale des zones tampons sur la superficie totale du Camp Central (**Figure 8B**). La relation pour les gisements réels indique qu'il existe effectivement une relation normale entre la distance de la faille et la quantité de mines et que cette relation n'est pas aléatoire. Elle indique également, comme pour la population aléatoire de gisements, qu'à partir de 600 m, il n'y a plus de relation spatiale. Cette distance correspond en fait à l'espacement moyen des failles du Camp Central. On note également sur le graphique une brisure de pente entre 200 et 300m qui pourrait représenter soit une distance au-delà de laquelle une réelle décroissance du nombre de gisements par rapport aux failles est observée, soit une distance moyenne d'un sous-groupe de failles situées au centre du camp (**Figure 8**).

2.3 Corrélation régionale et âges de familles de failles connues dans le GBR

La majorité des failles dans le Camp Central sont considérées comme étant d'une origine synvolcanique (Gibson, 1989 ; Santaguida et al. 1997). En particulier, les failles orientées $N070 \pm 20$ et NO-SE (dont celles de Despina et McDougall) sont réputées fertiles (Setterfield et al. 1995). Est-ce le cas ailleurs dans le reste du GBR ? Une approche simple consiste à prendre un certain recul et à regarder au-delà du GBR si certaines familles de failles recoupent des roches plus récentes ou se corrélient à des événements tectoniques post-archéens (**Figure 9**).

À partir de l'ensemble des failles du GBR ($n=832$), tant du côté ontarien (OGS, 2005) que québécois (SIGEOM, avril 2008), cinq principales familles de failles sont distinguées sur une base statistique (**Figure 9**), soit en ordre décroissant de fréquence : N050-N090, N010-N050, N135-N160, N090-N135 et N-S (quadrants N160-N180 et N000-N010).

La famille de failles N050-N090 correspond à la majorité des failles du Camp Central (**Figure 3**). Cette famille de failles se prolonge à l'extérieur du camp une fréquence moindre vers le NE, entre les failles internes et externes de Misema, et vers l'ouest du côté ontarien. Très peu de ces failles sont connues au nord de la Faille Hunter Creek, dans le NO de la portion québécoise du GBR. En Ontario, plusieurs de ces failles sont parallèles au contact des unités inférieure et supérieure du GBR (**Figure 9**), ce qui suggère qu'elles ont pu jouer un rôle important dans la géométrie et probablement la mise en place de ce groupe. Seulement quelques failles sont présentes immédiatement au nord de la Faille Porcupine – Destor et aucune au sud de la Faille Cadillac – Larder Lake, indiquant que ce réseau de failles est confiné principalement à la Caldeira de Misema, témoignant ainsi en faveur de failles synvolcaniques. Régionalement, seules quelques failles kilométriques recoupent le Groupe de Cobalt (sédiments protérozoïques vers 2,2 Ga) au sud de Rouyn-Noranda et en Ontario. Il pourrait s'agir de structures

précoces et sous-jacentes au bassin sédimentaire et réactivées au cours du Protérozoïque. Dans la région de Chibougamau au NO de l'Abitibi, des failles d'orientation similaire sont présentes avec une densité comparable à celle observée dans le GBR. En particulier les failles Wedding-Lamarck et Gwillim et, dans une moindre importance, les failles Chibougamau Copper et Laura s'inscrivent exactement dans le prolongement du réseau reconnu dans le GBR.

La famille de failles orientées N010-N050 est présente surtout au centre et à l'est du GBR au Québec. Elle est peu développée, ou moins bien reconnue en Ontario ([Figure 9](#)). Plusieurs failles de ce réseau recoupent les couloirs de déformation des failles Porcupine-Destor et Cadillac-Larder Lake, ainsi que les roches sédimentaires protérozoïques du Groupe de Cobalt. Coïncidence ou non, les failles de cette famille sont concentrées dans un corridor d'une vingtaine de kilomètres de largeur qui correspond au prolongement de la branche la plus à l'est du bassin sédimentaire protérozoïque. Ces failles délimitent la portion québécoise de ce bassin et elles pourraient représenter des failles normales limitant un graben protérozoïque. D'autres évidences suggèrent que les failles N010-050 sont protérozoïques puisque, régionalement en Abitibi, la plus grande concentration de ces failles se trouve dans la partie est de la sous-province et que ces failles sont parallèles et associées au front de chevauchements du Grenville (1,0 Ga). Cette direction de failles correspond également à l'orientation du chevauchement du Kapuskasing (Percival et McGrath, 1986). La majorité des failles de ce réseau semble donc être d'âge protérozoïque et matérialiserait soit des épisodes de compression E-O reliés aux chevauchements du Kapuskasing et/ou du Grenville (Faure et Jébrak, 1991), soit un épisode d'extension lié au bassin sédimentaire du Groupe de Cobalt.

La famille de failles N135-N160 est surtout présente en Ontario et leur nombre s'accroît vers l'ouest depuis le Québec. Les failles de ce réseau recoupent à plusieurs endroits le contact entre le GBR et celui d'Hébécourt (unités inférieure et supérieure du GBR, [Figure 9](#)) ainsi que la faille Porcupine-Destor au Québec et en Ontario. À l'échelle régionale, ces failles se corrént à un corridor de failles mesurant plus 100 km, orientées NO-SE et recoupant les bassins sédimentaires protérozoïques ([Figure 9](#)). Ces grandes failles (dont les failles de la rivière Montréal et du Lac Cross) sont des structures d'effondrements reliées au graben du Lac Témiscamisque et ont une expression topographique très claire sur les modèles numériques d'élévation de terrain. Les failles de ce graben ont joué à plusieurs reprises, notamment au cours du Cambrien et du Paléozoïque et probablement au Crétacé (Faure et al. 1996).

Dans le GBR, la famille de failles N090-N135 est principalement reconnue dans le Camp Central et dans le Blake River Ouest (Figures 3 et 9). En Ontario, la famille est moins bien développée ou reconnue. Dans le Camp Central, elle est bien connue pour contenir les gisements de SMV. On retrouve en effet plusieurs mines, dont Horne, Waite-Amulet, Delbridge, Bedford Hill et Norbec, de même que le gisement Ansil Ouest, à moins de 400m de ces failles ESE ([Figure 3](#)). Sauf exceptions, ces failles sont recoupées par la famille N070 du Camp Central, indiquant qu'elles sont antérieures et donc synvolcaniques. Par contre, la Faille Mouilleuse est une longue faille également orientée N130, mais qui recoupe l'ensemble du GBR. Sur un modèle numérique d'élévation de terrain, elle se poursuit vers le SE dans le Pontiac sur une cinquantaine de kilomètres et vers le NO du côté ontarien sur une distance comparable ([Figure 9](#)). La portion de cette faille située au cœur du GBR pourrait représenter une structure synvolcanique, mais ses extensions vers le SE et NO sont interprétées comme la néoformation de failles cassantes et tardives à partir du nucleus de la structure lors de la formation du graben du Lac Témiscamisque.

Finalement, les failles orientées N-S (N160-N180 et N000-N010) sont peu communes dans le GBR ([Figure 9](#)). Régionalement, elles se corrént à de grandes structures N-S qui recoupent en Ontario l'extrémité ouest de la Sous-Province de l'Abitibi et les sédiments de bassins protérozoïques. Ces failles d'envergure régionale pourraient être associées à l'essaim de dykes de Nipissing.

En résumé, la majorité des failles des familles N050-N090 et N090-N135 sont interprétées comme étant des structures synvolcaniques. La famille N050-090 du Camp Central est propre à Misema et s'enligne ailleurs en Abitibi avec d'autres failles synvolcaniques. La majorité des autres failles sont à fort angle par rapport au grain structural de l'Abitibi et sont corrélées à différents événements tectoniques de nature fragile qui ont évolué depuis le début du Protérozoïque.

3 MÉTHODE DE RECONNAISSANCE DES FAILLES PAR LA RUPTURE DE LA MAILLE DE DIRECTION ET DE PENDAGE DE LA STRATIGRAPHIE VOLCANIQUE

3.1 État actuel sur la connaissance des failles

Dans le GBR, il existe des disparités importantes quant à la connaissance, la distribution et la résolution des failles, d'une part entre l'Ontario et le Québec, et d'autre part au sein même de la portion québécoise de ce groupe ([Figure 9](#)). Par exemple, dans le Camp Central, on dénombre environ 130 failles de plus de 500m de long dans une superficie de 220 km². Ces failles ont été cartographiées ou interprétées à une échelle de 1 : 2500 par Gibson (1983) et à une échelle plus régionale par de Rosen-Spence (1976). Par contre, dans le GBR Ouest, dans les quinze (15) derniers kilomètres avant la frontière avec l'Ontario, il y a environ une soixantaine de failles pour une superficie de plus de 500 km². Un des objectifs de ce projet est de tenter de niveler cet écart en identifiant de nouvelles failles. Pour cette raison, une nouvelle approche pour reconnaître des failles avec déplacement ou contrôle volcanique est présentée. Elle a pour but d'identifier, dans la portion québécoise du GBR, des prolongements de failles connues, de nouvelles failles, ou des basculements le long de dykes synvolcaniques. La reconnaissance de nouvelles failles est capitale pour générer de nouvelles cibles d'exploration.

3.2 Nouvelle méthode d'identification de failles

Dans le Camp Central, plusieurs failles synvolcaniques montrent des changements importants de directions et de pendages de S0 (de Rosen-Spence, 1976 ; Cousineau et Dimroth 1982 ; Gibson, 1983 ; Gibson 1989). Au nord de la Caldeira de Noranda par exemple, les variations de direction de part et d'autre de la Faille Hunter Creek atteignent près de 90 degrés et les différences de pendage sont de l'ordre de 70 degrés ([Figure 10](#) et [Figure 12](#)).

La méthode développée est basée sur la rupture dans la surface d'interpolation des données de stratification S0. Les directions et pendages de milliers de données de terrain ([Figure 10](#) et [Figure 11](#)) et d'orientation de conducteurs formationnels de type Input ont été maillés en utilisant la méthode des voisins naturels ([Figure 12](#) et [Figure 13](#)). L'approche consiste à repérer des ruptures significatives dans les surfaces d'interpolation des directions et des pendages. À l'exception de la région comprise entre les failles internes et externes de Misema, les plis dans le GBR sont quasi inexistantes (Pearson et Daigneault, 2009). Les ruptures nettes et contrastées dans les mailles peuvent alors être expliquées par des basculements, des effondrements et des mouvements synvolcaniques le long d'un plan, entraînant des variations significatives de pendages et/ou de directions des couches volcaniques de l'ordre de quelques degrés et plus ([Figure 12](#) et [Figure 13](#)). Par contre, pour de faibles différences de directions et de pendages (de l'ordre de quelques degrés), la signification de la rupture de la maille est moins évidente et plus discutable. Il pourrait s'agir de failles cassantes post-volcaniques par exemple. Cette méthode ne permet pas de distinguer entre une faille et un pli serré. Par contre, un pli ouvert, comme ceux documentés entre les failles internes et externes de la Caldeira Misema, ne donnerait pas une ligne de rupture nette, mais une zone progressive de variation de direction et de pendage.

3.2.1 Linéaments topographiques

L'approche complémentaire afin d'identifier de nouvelles failles dans le GBR au Québec a été d'utiliser un modèle numérique de terrain et une image IRS (Infra Red Spectrometry) pour identifier des prolongements de failles connues. L'idée est de voir si une faille existante est située dans une dépression topographique. Si tel est le cas et si la trace de la faille termine avant la fin de la dépression, on considère qu'il y a une forte probabilité que cette faille se poursuive jusqu'à l'extrémité du creux topographique hôte de la faille connue.

3.2.2 Base de données

Pour le Québec, la source pour la trace des failles dans le GBR provient principalement du SIGEOM (avril 2008). Cette base de données représente une synthèse de travaux historiques et cartographiques, principalement des rapports géologiques, des cartes de compilations, des thèses, et de travaux statutaires. Pour l'Ontario, les données numériques proviennent de l'OGS (2005). Pour les dykes mafiques et intermédiaires, la compilation faite par Pearson (2006) a été utilisée, mais certains secteurs ont fait l'objet d'une réinterprétation à partir de cartes géologiques plus détaillées.

Plusieurs sources ont été utilisées pour les données de stratification S0, totalisant 5708 mesures de directions et 1909 mesures de pendages compilés. Ces sources sont :

- Les données numériques du SIGEOM (2007)
- Les mesures de S0 rapportées sur les cartes de compilation (1 : 20 000) et qui n'apparaissent pas dans la banque numérique SIGEOM ;
- Les données de terrains de H. Gibson (1983), de V. Pearson (1994; et campagne de terrain CONSOREM 2005-2006), de C. Pilote au NE du GBR (Breakwater Resources), et de R. Daigneault (campagne de terrain CONSOREM 2005-2006).

De plus, 1585 conducteurs linéaires de type Input ont été ajoutés aux directions de S0 pour le maillage. Ces conducteurs électromagnétiques ont été utiles afin de combler les vides dans la compilation de S0 dans les régions où il n'y a pas d'affleurement. En effet, les niveaux conducteurs de graphite et de sulfures (pyrrhotite) correspondent majoritairement à des horizons sédimentaires – exhalatifs marquant communément une pause dans le volcanisme. Ils sont considérés comme un bon indicateur de S0. Ces conducteurs formationnels se distinguent des conducteurs structuraux (failles) dont l'attitude de la trace est discordante et à fort angle par rapport au S0 reconnu localement.

3.2.3 Résultats

Les mailles de direction et de pendage de S0 ont été mises en relation spatiale avec les trois principaux systèmes de dykes mafiques – intermédiaires. Le but est d'identifier les dykes synvolcaniques « actifs », c'est-à-dire ceux qui délimitent des domaines différents de directions et/ou de pendages. Les résultats concernant les prolongements de failles et les nouvelles failles identifiées sur les ruptures de mailles sont présentés dans la seconde partie.

3.2.3.1 Identification des dykes mafiques et intermédiaires actifs

Les ruptures de mailles les plus significatives sont observées le long de dykes associés aux centres volcaniques et au complexe intrusif du Horseshoe. En bordure du Horseshoe, des changements abrupts sont observés dans les mailles de direction et de pendage de S0 et le long de plusieurs dykes associés au complexe intrusif ([Figure 14](#) et [Figure 15](#)). L'intérieur du Horseshoe est caractérisé par une maille de pendage homogène avec une valeur moyenne de 80 ± 10 degrés ([Figure 15](#)). Les directions varient également peu, entre 90 et 105 degrés, à l'exception de la branche SE du Horseshoe, où les directions de part et d'autre du dyke montrent des écarts supérieurs à 45 degrés ([Figure 10](#) et [Figure 14](#)). Les pendages à la périphérie du Horseshoe forment une couronne externe de 2 km de large avec des valeurs moyennes élevées à 70 ± 10 degrés ([Figure 15](#)). Cette couronne de forts pendages correspond à la limite externe d'une double anomalie géophysique positive (gravimétrique et magnétique) associée au Horseshoe.

Des ruptures dans les mailles sont observées le long de la majorité des dykes associés au Horseshoe. En particulier, les dykes orientés NNE-SSO, au centre et au NO du GBR, délimitent des domaines forts contrastés de directions et de pendages ([Figure 14](#)). Ces ruptures de mailles se poursuivent sur quelques kilomètres à l'une ou l'autre des extrémités des dykes indiquant que les intrusions représentent des plans de faille synvolcaniques. C'est également le cas pour les plutons de Méritens et de Powell orientés NE-SO qui sont localisés dans le prolongement d'une rupture associée au réseau de failles synvolcaniques du Camp Central ([Figure 14](#) et [Figure 15](#)). Les dykes et les ruptures de mailles disposés de façon radiale par rapport au Horseshoe forment globalement un cortège de failles en forme d'éventail. Cet éventail indiquerait un épisode d'extension locale situé au centre du Horseshoe, avec une contrainte verticale maximale σ_1 et une contrainte minimale σ_3 horizontale perpendiculaire à la direction des failles et des dykes situés à la périphérie de la superstructure ([Figure 14](#)).

En résumé, d'importantes variations de directions et de pendages de S0 sont observées de part et d'autre de plusieurs des dykes associés aux centres volcaniques et de sommets de caldeiras et de la majorité des dykes du complexe intrusif associé au Horseshoe ([Figure 16](#)). Ceci indique que la plupart des dykes mafiques et intermédiaires se sont mis en place le long de failles ou de discordances volcaniques linéaires et circulaires, après d'importants basculements, effondrements ou soulèvements volcaniques, vraisemblablement lors de périodes de tumescence de chambres magmatiques enfouies.

3.2.3.2 Prolongements de failles connues et nouvelles failles

La première étape du traitement a été de repérer les ruptures dans les mailles de directions et de pendages de S0 aux extrémités de failles connues. En tout, 57 prolongements de failles ont été interprétés sur la maille des directions de S0 ([Figure 17](#)). Ce sont des prolongements de failles préférentiellement orientées NE-SO et NO-SE, dont la moyenne des longueurs est de 2,7 km. Une extension de 3 km à la Faille Hunter Creek est proposée vers le NE, de l'autre côté de la faille annulaire interne. La majorité des prolongements sont marqués par des ruptures nettes et contrastées. Au NO du GBR cependant, les prolongements de failles orientées NO-SE sont plus longs, mais les ruptures sont plus subtiles et moins contrastées qu'ailleurs. C'est ainsi qu'une extension de 10 km de longueur est proposée pour la Faille Mouilleuse. Sur la maille des pendages de S0, 20 prolongements de failles ont été identifiés ([Figure 18](#)). Il s'agit de ruptures de moins de 5 km de longueur situées au sud de la faille annulaire interne et qui ne sont pas associées à des failles majeures connues.

Les ruptures dans la maille des directions de S0 ont permis de proposer 68 nouvelles failles dans le GBR ([Figure 19](#)). Deux familles de nouvelles failles dominent : la famille NE avec des failles orientées entre N030 et N050, et la famille SE dont les orientations varient entre N125 et N160. Dans le Camp Central, 15 nouvelles failles sont interprétées. La majorité de celles-ci ont moins de 2 km de longueur, sont parallèles aux réseaux de failles synvolcaniques connues et correspondent vraisemblablement à des failles secondaires. Plusieurs de ces failles sont orientées N050, parallèlement aux failles synvolcaniques de la Caldeira de Noranda, et trois sont parallèles aux failles Despina et McDougall. Une importante faille de 10 km de longueur et orientée N040 a été identifiée comme étant une possible subsidiaire de la Faille Hunter Creek à son extrémité NE ([Figure 19](#)). Cette nouvelle faille traverse la faille annulaire interne. Les nouvelles failles identifiées sur la maille des pendages de S0 sont au nombre de 13 ([Figure 20](#)). La majorité des failles ont moins de 6 km de longueur et sont orientées NO-SE. Trois failles NE-SO de plus de 6 km ont été identifiées dans le GBR Ouest délimitant des domaines de faibles et forts pendages.

En résumé, la méthode de reconnaissance de failles à partir des ruptures de mailles des directions et des pendages de S0 a permis de mettre en évidence 153 nouvelles failles ou prolongements de failles ([Figure 21](#)), principalement localisés dans le GBR Ouest et au sud de la faille interne (secteur sous représenté en terme de nombre de failles connues). De plus, 81 prolongements de failles ont été interprétés à partir d'un modèle numérique d'élévation ([Figure 22](#)), 9 prolongements à partir des données électromagnétiques (EM) et 6 prolongements sur l'imagerie IRS (Infra Red Spectrometry). Ainsi, 249 nouvelles failles ont été identifiées au total ([Figure 23](#)). Dans l'ensemble, les directions des nouvelles failles sont très similaires à l'orientation des principales familles de failles connues. De plus, la densité et la distribution des nouvelles

failles, principalement dans le GBR Ouest, sont comparables à celles des failles du côté ontarien. Cette cohérence indique que les failles interprétées par la méthode des mailles et sur les données d'élévation ont, dans l'ensemble, une réelle signification.

3.3 Sommaire

Trois systèmes distincts de dykes mafiques et intermédiaires ont été mis en évidence :

- 1) Les dykes annulaires précoces disposés en feuillets sub-parallèles et curvilinéaires à la périphérie de la Caldeira de Misema ;
- 2) Les dykes annulaires locaux associés à des centres volcaniques et des sommets de caldeiras dans le GBR Ouest ou entre les failles internes et externes (réseau ovoïde de Pearson et Daigneault, 2008);
- 3) Le Horseshoe et le cortège de dykes en éventail associé qui recourent les deux premiers réseaux.

Chaque système de dykes a sa propre organisation architecturale et sa distribution au sein de la mégacaldeira. Les dykes annulaires précoces de Misema et la structure du Horseshoe semblent avoir un meilleur lien spatial (et non temporel) avec la position des mines de sulfures massifs. Ces deux systèmes de dykes représenteraient des structures synvolcaniques précurseurs des minéralisations SMV du GBR. Ils traduiraient des accidents précoces et probablement profonds de l'édifice volcanique sous les séquences volcaniques du Camp Central. Ces structures auraient été préférentiellement réactivées et réutilisées lors de la principale période de minéralisation et de subsidence de la Caldeira de Noranda (Pluton de Flavrian).

Il a été démontré dans cette étude qu'il existe dans le Camp Central une relation de proximité entre les mines et les failles connues : la majorité des gisements sont situés à moins de 300m d'une faille synvolcanique et le nombre de mines décroît rapidement depuis la faille. Au-delà de 600 m, la relation de proximité devient aléatoire parce que cette distance correspond à la rythmicité des failles dans ce camp minier.

La majorité des failles à fort angle par rapport au grain structural de Misema (familles NE et NO) recourent les corridors de déformation de Destor-Porcupine et de Cadillac-Larder Lake. Régionalement, ces failles recourent également les roches sédimentaires du Protérozoïque ou sont parallèles à des structures protérozoïques, voire mésozoïques. Ces structures tardives sont corrélées à différents événements tectoniques de nature fragile qui ont évolué depuis le début du Protérozoïque. Cependant, la majorité des failles orientées N050 à N135 sont interprétées comme des structures synvolcaniques. Le système de failles du Camp Central orienté N045 à N080 est propre à la Caldeira de Misema.

La méthode de reconnaissance de failles à partir des ruptures de mailles de directions et de pendages de S0 montre que de nombreux dykes sont en fait des failles synvolcaniques. La méthode a permis d'identifier 158 nouvelles failles ou prolongements de failles existantes en plus des 96 prolongements de failles interprétés principalement à partir des données d'élévation. Considérant qu'une faille connue sur 20 (5%) dans le GBR est l'hôte d'une mine, les 249 nouvelles failles ou prolongements de failles identifiés présentent une probabilité intéressante de trouver de nouvelles mines.

4 RECONNAISSANCE DE STRUCTURES SYNVOLCANIQUES (DYKES ET FAILLES) FERTILES DANS LE GROUPE DE BLAKE RIVER : UNE APPROCHE GÉOCHIMIQUE

4.1 Introduction

Les études sur les altérations en Abitibi, et en particulier dans le Camp Central, ont porté sur la caractérisation et la distribution des altérations minérales et géochimiques autour des gisements de SMV (Riverin et Hodgson, 1980; Franklin et al. 1981 ; Morton et Franklin, 1987 ; Barrett et al. 1994 ; Cattalani et al. 1993 ; Cattalani et al. 1994). Cependant, très peu d'études ont porté sur l'altération des failles synvolcaniques proprement dites. Deux questions sont ici posées : 1) Quelles signatures d'altération rechercher le long des failles minéralisées ? 2) Comment distinguer les failles fertiles synvolcaniques des failles non fertiles synvolcaniques, syn ou post-tectoniques?

Cette partie du rapport est consacrée à la reconnaissance de la fertilité des failles pour les minéralisations de type volcanogène à Cu et Zn dans la Mégacaldeira de Misema, plus spécifiquement dans la portion québécoise du GBR. Il s'agit d'une approche méthodologique sur l'altération à partir principalement de données lithogéochimiques (éléments majeurs). Les altérations le long des dykes mafiques et intermédiaires et en bordure des failles connues et nouvellement identifiées (voir la section précédente) seront investiguées dans le but de reconnaître et caractériser des systèmes hydrothermaux fertiles le long de structures synvolcaniques et ainsi distinguer les failles stériles ou « tardives » qui n'ont pas de lien spatial avec les minéralisations.

4.2 Données utilisées

Une banque géochimique unique de données provenant des compagnies Xstrata Copper (bon nombre de données de cette banque proviennent du MRNF du Québec : SIGEOM), Alexis Resources et Breakwater Resources a été construite. Le nombre d'échantillons s'élève à 28 757. Ceux-ci sont localisés dans la tranche de profondeur comprise entre 0 et 250 m ([Figure 24](#)). Cet intervalle de profondeur a été utilisé pour que seules les données près, ou à la surface, soient mises en relation avec les données cartographiques, même si on considère que les failles sont en général de pendage abrupt. La distribution des données montre une forte densité d'échantillons dans une couronne de 7 à 12 km de large autour du Pluton de Flavrian (incluant le Camp Central) et dans le secteur de la Mine Bouchard Hébert ([Figure 24](#)). La répartition des échantillons et leur bonne densité permettent de produire des cartes par interpolation des données se rapportant à l'altération hydrothermale. Toutefois, certains secteurs sont surreprésentés par l'échantillonnage et un effet de grappe est observé en plusieurs endroits. Bien qu'une interpolation par krigeage serait plus robuste, une interpolation par la méthode des voisins naturels permet tout de même de tenir compte de l'hétérogénéité de l'échantillonnage.

4.3 Indicateurs de fertilité

- Une série d'indicateurs de fertilité ont été testés d'abord par rapport aux réseaux de dykes et ensuite par rapport aux failles du GBR. Les indicateurs de fertilité sont de trois types : les indicateurs d'altération hydrothermale volcanogène,
- les indicateurs de minéralisation,
- les indicateurs d'association favorable.

Le **tableau 3** résume les 21 indicateurs de fertilité qui comprennent 16 critères d'altération, 4 critères de minéralisation et un critère d'association favorable. Les critères d'altération viennent d'indices lithogéochimiques connus (Franklin, 1997) et des indices Normat (Piché et Jébrak, 2004). Les critères de minéralisation impliquent des relations topologiques de proximité exprimées quantitativement (nombre

d'observation) et le critère d'association favorable est de nature booléenne (présence ou absence de dykes).

Tableau 3 : Indicateurs de fertilité (indicateurs d'altération, de minéralisation et de favorabilité pour les SMV) documentés autour des failles

Indicateurs d'altération	Processus d'altération (Franklin, 1997)
<u>Indices</u> (formule *100)	
Séricite [†] ($K_2O/(K_2O + Na_2O)$)	Remplacement des feldspaths par la séricite
Chlorite [†] ($MgO + Fe_2O_3)/(MgO + Fe_2O_3 + 2CaO + 2Na_2O)$)	Addition de chlorite (Fe+Mg), pertes Ca et Na par destruction des feldspaths
Ishikawa ($K_2O+MgO)/(K_2O+MgO+Na_2O+CaO)$)	Addition K + Mg (eau mer) vs lessivage Na + Ca
Spitz-Darling (Al_2O_3/Na_2O)	Pertes en Na, Al conservé
Carbonatation	Précipitation de carbonates lessivés ;
Discrimination (CO_2/CaO)	Discrimine les différentes phases de carbonatation
Saturation ($CO_2/CaO+FeO+MgO+MnO$)	
<u>Minéraux normatifs</u> (Piché et Jébrak, 2004)	
Actinote	
Chlorite magnésienne	Altération au niveau des failles
Chlorite ferrifère [†]	Altération au niveau de la pipe d'altération
Épidote [†]	Gains en Ca, altération haute température
Séricite [†]	Gains en K
Pyrophyllite	Aluminium résiduel
<u>Indices normatifs</u> (Piché et Jébrak, 2004)	
IFRAIS	Intensité globale de déplétion en alcalis
IPARA	Isole la composante paragonite
ISER	Formation de séricite
ICHL	Formation de chlorite
IPAF	Indice de carbonatation
<u>Indicateurs de minéralisations Cu-Zn</u>	
Points d'observation de sulfures (Py+Po+Cp+Sp)	
Présence de lentilles de sulfures massifs	
Présence de mines de Cu-Zn	
Indices de cuivre (Cu ≥ 1% et normalisé sur 1 m)	
<u>Indicateurs de favorabilité</u>	
Présence de dykes mafiques ou intermédiaires	

[†] Normalisé par rapport aux lithologies V1 et V2

Certains indices et minéraux d'altération sont plus sensibles que d'autres à la composition géochimique de la roche. Le bagage minéralogique primaire de la roche, qui se reflète dans la composition géochimique, guide la nature et l'intensité de l'altération de cette roche (Piché et Jébrak, 2004). Un test de sensibilité a été effectué sur la banque de données lithogéochimiques afin de vérifier les valeurs moyennes d'indices d'altération en fonction des roches felsiques et mafiques (division géochimique des rhyolites et andésites sur la base combinée du SiO₂ et du ratio Zr/TiO₂).

L'équation suivante a été utilisée :

$$\frac{\text{(Valeur échantillon felsique - Moyenne du groupe felsique)}}{\text{Écart type du groupe felsique}}$$

La [Figure 25](#) montre que les indices séricite et chlorite, les minéraux normatifs chlorite ferrifère et magnésienne et épidote, ainsi que l'indice IPAF sont plus sensibles aux compositions lithologiques que d'autres indices, comme Ishikawa et ISER qui montrent peu d'écarts sur la médiane. Par conséquent, une normalisation est effectuée sur les indices et minéraux normatifs qui présentent de grandes différences au niveau des médianes ([Figure 25](#)). La [Figure 26](#) montre en carte l'effet de cette correction pour l'épidote normative par rapport aux rhyolites et aux andésites.

Les données sur les indices et minéraux normatifs d'altération (après normalisation) ont été aussi maillées par la méthode des voisins naturels ([Figure 26](#)). Les points d'observation de sulfures et les indices de cuivre ($\text{Cu} \geq 1\%$ normalisé sur 1m) ont été maillés en termes de densité de points par km^2 par la même méthode d'interpolation.

4.4 Relation spatiale entre altérations et dykes mafiques

Plusieurs dykes mafiques représentent des limites de zones d'altération contrastée. Par exemple sur la maille de l'indice paragonite (IPARA), des dykes annulaires de la couronne nord de Misema isolent différents domaines d'altération (traits blancs sur la [Figure 27](#)). Cette altération est également confinée à l'enceinte de la Caldeira New Senator par les dykes orientés NO-SE (traits jaunes sur la [Figure 27](#)). Il en est de même pour le bloc Horne qui est moins altéré que la portion sud de Camp Central (traits noirs sur la [Figure 27](#)).

La maille de IFRAIS témoigne de l'intensité globale de la déplétion en éléments alcalins (Piché et Jébrak, 2004). Cet indice montre qu'une des zones les plus altérées dans le GBR à l'extérieur de la Caldeira de Noranda se situe au nord-ouest du Pluton de Flavrian ([Figure 28](#)). Des ruptures linéaires et parallèles dans cette maille ainsi que dans celle de l'indice séricite sont localisées de part et d'autre d'un complexe de dykes (pointillé blanc sur les [Figure 28](#) et [Figure 29](#)). Ce motif d'altération par rapport aux dykes pourrait traduire une activité hydrothermale importante dans ce secteur. Les autres centres volcaniques sont peu ou pas altérés en alcalis (tirets blancs sur la [Figure 28](#)). Une zone fortement altérée en alcalis et comparable en intensité à celle du Camp Central est observée également sur le flanc ouest du Pluton de Flavrian ([Figure 28](#)).

Le complexe de dykes associé au Horseshoe, de même que le Dyke Dufresnoy et les dykes des failles Despina et McDougall, semble également avoir un contrôle important sur la distribution de l'altération, en particulier sur la carte de l'indice séricite ([Figure 29](#)).

4.5 Relation spatiale entre altérations et failles

L'approche pour les failles est plus complexe par rapport à celle réalisée sur les dykes. L'idée est de dégager les critères d'altération et de minéralisation de type volcanogène d'abord sur les failles connues. Après avoir reconnu les assemblages d'altération associés aux indices de minéralisation sur une partie de cette population de failles, il s'agit de retrouver parmi les failles restantes (failles connues, nouvelles failles et prolongements de failles) la signature de ces assemblages fertiles.

La base de données sur les failles ($\geq 0,3$ km de longueur) est constituée des 580 failles connues et des 250 nouvelles failles et prolongements de failles pour un total de 830 failles.

4.5.1 Méthode

Une base de données a été construite sur l'altération et les minéralisations des failles connues et nouvellement identifiées (section précédente). Pour chacune des failles, une évaluation visuelle a été réalisée afin de voir s'il existe une relation spatiale avec les indicateurs de fertilité définie au **tableau 3**. Deux méthodes ont été utilisées pour établir cette relation spatiale : 1) des profils de signatures

d'altération perpendiculaires aux failles et 2) la correspondance spatiale visuellement positive entre les mailles d'altération et les failles. Pour les critères de minéralisation, on considère également la présence ou non de dykes mafiques ou intermédiaires à moins de 200 m de la faille et la présence ou non d'une mine ou d'un gisement de Cu-Zn \leq 400m de la faille.

Les profils de signatures d'altération perpendiculaires aux failles ont été réalisés avec un logiciel d'analyse spatiale radiale construit par le CONSOREM ([Figure 30](#)). Ce logiciel permet de détecter les variations de signaux géochimiques, géophysiques, et minéralogiques en s'éloignant d'un point, d'une ligne, ou d'une surface. Dans le cas des failles, le programme permet de visualiser les données ponctuellement ou en boîtes à moustaches. Cette dernière représentation graphique permet d'évaluer et de comparer la distribution d'échantillons, par intervalles de distance pour une altération donnée, selon un profil perpendiculaire à la ligne ([Figure 30](#)). Cette approche nécessite d'avoir une quantité suffisante d'analyses géochimiques afin de bien démontrer la croissance ou la décroissance d'une altération par rapport à la distance de la faille analysée. Comme il est très difficile d'attribuer de manière quantitative cette relation, il est convenu d'attribuer dans la banque de données des failles une valeur de 1 pour une relation positive (montrant une croissance d'une altération vers la faille) ou une valeur de 0 dans le cas d'une relation spatiale négative ou ambiguë.

Si le nombre de données géochimiques en bordure d'une faille est trop faible ou si deux failles se croisent, la relation spatiale ne peut être établie par le logiciel d'analyse du CONSOREM. Pour ces cas, la méthode utilisée a été de comparer visuellement la géométrie des contours du 97^{ième} centile de la maille d'un indicateur donné d'altération par rapport à l'orientation d'une faille ou d'un groupe de failles ([Figure 31](#)). Une correspondance spatiale positive entre l'enveloppe d'altération et la faille permet encore une fois l'attribution de la valeur 1 dans la base de données. La [Figure 32](#) montre de manière schématique les quatre cas de relation spatiale positive.

La banque de données finale se compose ainsi de :

580 failles connues dont :

- 302 failles connues sans aucun indicateur de fertilité documenté (pas de données ou pas d'altération);
- 95 failles connues avec un seul indicateur de fertilité ;
- 183 failles connues avec deux indicateurs de fertilité et plus, dont 13 avec dix indicateurs et plus.

250 nouvelles failles dont :

- 106 nouvelles failles sans aucun indicateur de fertilité documenté (pas de données ou pas d'altération);
- 61 nouvelles failles avec un indicateur positif ;
- 83 nouvelles failles avec deux indicateurs positifs et plus, dont 18 avec 5 indicateurs et plus.

4.6 Analyse en composantes principales (ACP)

Afin d'évaluer la fertilité des failles, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée seulement sur la population de failles connues de la base de données. L'ACP est un type d'analyse multivariable qui permet de mieux comprendre les relations entre un ensemble de données et/ou à former un nombre inférieur de variables non corrélées. Cela consiste à rechercher pour la population de failles connues les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre les 22 indicateurs de fertilité du **Tableau 3**.

4.7 Résultats

L'ACP a été réalisée sur les 183 failles connues qui présentent au moins 2 des 17 critères d'altération (les 6 indices géochimiques, 6 minéraux normatifs et 5 indices normatifs du **Tableau 3**) comme épidote + saturation en carbonates ou IPAF + IPYRO. L'objectif est de déterminer quelles altérations dans les failles sont associées à certains ou à la totalité des cinq critères de minéralisation du **Tableau 3**, ce qui revient à établir une liste de critères de fertilité des failles synvolcaniques. Les composantes 1 et 2 de l'ACP expliquent le maximum de variation dans la base de données et sont présentées sur le diagramme de la **Figure 33**. Ce diagramme fournit des informations sur les contributions des deux premières composantes principales. À l'exception de l'indice IPAF, tous les indices d'altérations et de minéralisations dans le graphique sont situés à une bonne distance du centroïde (coordonnées 0,0), ce qui indique que les différents groupes d'indices se démarquent bien entre eux dans cette dimension. Le diagramme montre également trois principales tendances au regroupement que l'on observe également avec les composantes 3 et 4 sur les diagrammes de contribution de la **Figure 34**. Ainsi, le groupe d'indicateurs d'altération chlorite – épidote – actinote a des contributions négatives sur la composante 1, mais positives sur la composante 2, alors que l'assemblage ISER – séricite normative – carbonates a des contributions négatives importantes dans la deuxième composante (**Figure 33**). Tous les diagrammes de contributions montrent une association claire, selon les composantes 1, 2 et 3, entre les critères de minéralisation (lentilles de SMV, présence de sulfures, indices de Cu, mines de Cu-Zn et dykes) et les altérations de types volcanogènes (indices Hishikawa et Spitz-Darling et la pyrophyllite normative). On observe également des associations statistiques entre la chlorite ferrifère et IPARA et entre l'indice chlorite et l'indice normatif ICHLO et IFRAIS < 30. Ceux-ci se retrouvent dans l'entourage des critères de minéralisation (**Figure 34**), mais n'y sont jamais étroitement associés comme les altérations de types volcanogènes précédemment citées. Cela pourrait traduire des altérations distales volcanogènes. Le groupe d'indicateurs d'altérations chlorite – épidote – actinote – saturation en carbonates est un assemblage typiquement métamorphique et représenterait le bruit de fond de l'altération régionale dans les failles. L'indice de discrimination des carbonates (qui traduit les différentes variétés de carbonates) est associé aux deux indices de séricitisation (**Figure 33** et **Figure 34B**). Cette association pourrait traduire des altérations plus marginales, du type que l'on retrouve par exemple dans le secteur de la Mine Delbridge.

L'ACP permet ainsi de distinguer les assemblages d'altération fertiles des altérations qui ne sont pas associées à la minéralisation. Les assemblages d'altération et leur signification se résument ainsi :

- **Failles fertiles** (associées aux critères mine, sulfures, indices de Cu et lentilles SMV) :
 - 1) Dyke mafique + (Ishikawa + pyrophyllite) et/ou (Spitz-Darling) : altération fertile et proximale des failles minéralisées avec présence de dykes mafiques et intermédiaires.
 - 2) (ICHLO + chlorite index + IFRAIS < 30) : altération distale de la minéralisation ?
- **Failles non fertiles** :
 - 1) (Chlorite + actinote + épidote) et/ou (IPAF – CB saturation) : bruit de fond du métamorphisme régional aux schistes verts.
 - 2) (Séricite + ISER) et/ou (CB saturation + CB discrimination) et/ou (CHL fer + IPARA) : phénomène d'altération locale ou signature orogénique (?)

4.7.1 Failles stériles connues et nouvellement interprétées

Il y a 163 failles connues et 15 nouvelles failles ou prolongements de failles où il y a peu ou pas assez de données lithogéochimiques permettant d'attribuer une altération à la faille. Pour le reste, des failles considérées stériles, soit qu'aucun indicateur d'altération n'ait été détecté avec le logiciel d'analyse spatiale ou visuellement sur les mailles, soit que les altérations ne soient pas favorables (carbonatations, chlorite, épidote, séricite, IPAF) en dépit du fait que certaines de ces failles soient au voisinage de gisements de Cu-Zn (**Tableau 4**). Par exemple, il y a 76 failles connues et 47 nouvelles failles, ou prolongements de failles qui sont considérées comme n'ayant aucune altération volcanogène favorable ; parce qu'elles répondaient à la requête suivante : présence de chlorite, ou épidote, ou actinote, ou IPAF, ou saturation en carbonate et absence d'Ishikawa, pyrophyllite ou Spitz-Darling. Le nombre de failles considérées a priori stériles dans le GBR est estimé à 662, soit 460 failles connues et 202 nouvelles failles ou prolongements de failles (**Tableau 4**). 5 % de ces failles sont tout de même localisées à $\leq 400\text{m}$ d'un gisement de Cu-Zn et 21 % d'entre elles ont des dykes mafiques ou intermédiaires à $\leq 200\text{m}$. Le pourcentage de failles situées à $\leq 400\text{m}$ de mines et à $\leq 200\text{m}$ de dykes augmente avec le nombre d'indicateurs d'altération non fertiles reconnus dans les failles (**Figure 35**). En ce qui concerne les nouvelles failles et prolongements de failles, aucune relation significative n'est observée entre le nombre d'indicateurs d'altération dans ces failles et la présence ou non de mines et de dykes près des failles (**Figure 35**).

Tableau 4 : Résumé statistique sur l'altération des failles

Type de failles	Nb	% de failles à $\leq 400\text{m}$ d'une mine	% de failles à $\leq 200\text{m}$ de dykes
<u>Non fertiles</u>	662	5	21
<i>Connues</i>	460	4	18
Pas d'information	163	0.5	8
0 indicateur d'altération	139	4	21
1 indicateur	84	1	23
2 indicateurs	40	10	28
3 et 4 indicateurs	26	19	38
5 à 7 indicateurs	8	13	25
<i>Nouvelles*</i>	202	6	25
Pas d'information	15	13	27
0 indicateur	91	3	27
1 indicateur	53	4	21
2 indicateurs	26	8	38
3 à 5 indicateurs	17	18	18
<u>Fertiles</u>	168	26	45
<i>Connues</i>	120	30	43
1 indicateur	11	27	27
2 indicateurs	14	0	14
3 et 4 indicateurs	25	28	44
5 et 6 indicateurs	28	14	29
7 à 9 indicateurs	29	48	59
10 à 12 indicateurs	13	62	85
<i>Nouvelles*</i>	48	13	48
1 indicateur	8	0	38
2 indicateurs	10	0	20
3 et 4 indicateurs	14	21	57
5 à 11 indicateurs	16	31	63

* Incluant les nouvelles failles et les prolongements de failles.

La distribution des failles stériles (n=662), ou sans information, est présentée sur la [Figure 36](#). Deux pôles de direction se distinguent statistiquement : le réseau NE-SO (N035 à N080) et le réseau NO-SE (N120 à N145). Les longues failles rectilignes, connues ou nouvelles, orientées NO-SE et considérées stériles (incluant la faille Mouilleuse) confirment le caractère post-tectonique de plusieurs failles de ce réseau (événements fragiles protérozoïques et mésozoïques). La plupart des failles stériles N070 corrélées à la Caldeira de Noranda sont situées à l'extérieur du Camp Central, soit dans le sud du GBR, soit entre les failles internes et externes dans le GBR Est. Plusieurs failles parallèles aux failles internes et externes dans la région de Bouchard-Hébert semblent non altérées ou l'altération ne serait pas favorable.

4.7.2 Failles fertiles connues et nouvellement interprétées

Un total de 168 failles, 120 connues et 48 nouvellement interprétées, sont considérées fertiles, c'est-à-dire qu'elles ont l'une ou l'autre des altérations suivantes : Ishikawa, pyrophyllite ou Spitz-Darling ([Figure 37](#) et [Tableau 4](#)). Comparativement aux failles stériles, la proportion de failles fertiles (connues et nouvelles) situées près de mines de Cu-Zn et de dykes synvolcaniques est plus élevée et augmente avec le nombre d'indicateurs d'altération associés à ces failles ([Figure 35](#)). En moyenne, 30% des failles connues fertiles sont localisées à ≤ 400 m d'un gisement de Cu-Zn ([Tableau 4](#)) en comparaison à 7% pour les failles connues stériles ayant une association avec un indicateur d'altération et plus. De même, 43% des failles connues et considérées fertiles sont localisées à ≤ 200 m de dykes contre 27% pour les failles connues et stériles avec un indicateur d'altération et plus. La même tendance est remarquée pour les nouvelles failles et prolongements de failles.

Les failles reconnues comme étant fertiles se concentrent principalement au sud de la faille interne, dans l'enceinte de la Caldeira de Noranda, de part et d'autre du Pluton de Flavrian ([Figure 37](#)). Trois familles de failles fertiles se distinguent statistiquement :

- La famille N035 à N075 avec une forte concentration de failles autour de N060 à N070 correspondant aux failles minéralisées de la séquence des mines (Camp Central);
- La famille N095 à N115 qui est la seconde en importance du Camp Central;
- La famille N120 à N140 dont la localisation des failles correspond aux limites est et ouest de la Caldeira New Senator telles que définies par Pearson et Daigneault (2009) et qui n'est pas présente au nord de la Faille interne ([Figure 37](#)).

La localisation des failles fertiles le long de la marge ouest de New Senator correspond aux zones isotopiques de $\delta O^{18} \leq 6\%$ telles que définies par Taylor (2007). Il y a seulement une vingtaine de failles situées entre les failles internes et externes, dont une orientée N160 qui est située directement au sud des lentilles de SMV de la Mine Bouchard-Hébert. Il existe des failles fertiles à l'extérieur du Camp Central et orientées parallèlement aux failles synvolcaniques Hunter Creek et Horne Creek, élargissant ainsi la zone de fertilité de la Caldeira de Noranda au-delà de ces deux failles.

Cinquante-deux (52) failles de la banque de données ont été sélectionnées ([Figure 38](#)) à partir de la requête suivante :

Ishikawa + pyrophyllite, ou Ishikawa + Spitz-Darling, ou Spitz-Darling + pyrophyllite.

Ces failles sont considérées encore plus fertiles parce que ces indicateurs d'altération représentent l'addition du potassium et du magnésium et la perte du sodium et du calcium ou encore la présence d'aluminium résiduel par lessivage hydrothermal.

La distribution de ces failles montre que seule la famille de failles d'orientation N070 dans le Camp Central persiste et que seules les failles Despina et McDougall sont associées à la structure de la

Caldeira de New Senator. Cette distribution suggère que l'événement hydrothermal le plus important est associé à la formation de la Caldeira de Noranda dans le Camp Central. De plus, 37% de ces failles sont situées à $\leq 400\text{m}$ d'une mine de Cu-Zn et 85% ont des dykes à $\leq 200\text{m}$, ce qui représente un pourcentage nettement supérieur à n'importe laquelle des catégories de failles stériles ([Figure 35](#) et [Tableau 4](#)). Dans le détail, plusieurs indices et gîtes de Cu-Zn (Ag-Au) sont localisés à quelques centaines de mètres de ces failles ([Figure 39](#)). Des extensions de failles connues sont également proposées très fertiles ([Figure 39](#)).

4.8 Sommaire

Une banque unique de données numériques contenant 830 failles connues et interprétées a été construite en considérant leur proximité avec 22 indicateurs de fertilité comprenant des indicateurs d'altération géochimique et de minéraux normatifs et des indicateurs de minéralisation. Une analyse en composantes principales (ACP) sur les failles connues et associées à au moins deux indicateurs d'altération a permis d'isoler l'assemblage d'altérations lithogéochimiques fertiles de type volcanogène. Il s'agit de failles associées aux mines et à des lentilles de SMV ($\leq 400\text{ m}$), à des zones de sulfures, à des indices de cuivre et/ou localisées à proximité de dykes mafiques ($\leq 200\text{ m}$) et qui ont des altérations de types Ishikawa + pyrophyllite et/ou Spitz-Darling. La distribution des failles fertiles montre que seuls les systèmes hydrothermaux reliés à New Senator et au Chaudron sont fertiles. Cependant, les failles les plus fertiles se limitent au Camp Central et sont associées à la famille N070 de la Caldeira de Noranda et aux failles Despina et McDougall de la caldeira New Senator.

Les failles connues considérées non fertiles montrent un assemblage soit du type chlorite + actinote + épidote et/ou IPAF + saturation en carbonate qui témoigne du bruit de fond du métamorphisme, soit du type séricite + ISER et/ou saturation en carbonate + discrimination des carbonates et/ou chlorite ferrifère + IPARA qui traduit une signature orogénique ou des altérations localisées et marginales. La distribution spatiale des failles non fertiles confirme l'interprétation que la majorité des failles à fort angle (familles NE et NO) par rapport au grain structural du sud de l'Abitibi (E-O) et recoupant les roches sédimentaires du Protérozoïque (ou sont parallèles à des structures protérozoïques et mésozoïques) sont des structures tardives et cassantes dénuées de signature d'altération volcanogène.

L'approche statistique montre que les failles fertiles avec le plus grand nombre d'indicateurs d'altération reconnus (mesure de la diversité des altérations) sont situées dans une plus forte proportion près des mines en comparaison avec les failles dont le nombre d'indicateurs est faible ou nul ([Figure 35](#)). 75% des failles les plus fertiles contiennent des dykes mafiques ou intermédiaires à moins de 200 m de distance.

5 CONCLUSIONS

Il est démontré statistiquement et spatialement qu'il existe une relation de proximité entre les gisements de SMV et certaines familles de dykes mafiques et de failles dans le GBR. Dans le Camp Central par exemple, les gisements sont presque tous situés à moins de 300m d'une faille synvolcanique et le nombre de mines décroît rapidement depuis la faille. À l'échelle du GBR, seule une minorité de failles sont fertiles et contiennent des altérations lithogéochimiques de types volcanogènes. Les autres failles sont peu ou pas fertiles et sont considérées pour la plupart comme postérieures au volcanisme. Une analyse comparative avec la géologie régionale (Sous-province d'Abitibi et Province de Supérieur) montre que la majorité des failles des familles N050-N090 et N090-N135 sont interprétées comme étant des structures synvolcaniques. Le système de failles N050-090 du Camp Central est propre au GBR et s'enligne ailleurs en Abitibi avec d'autres failles synvolcaniques. Les autres familles de failles dans le GBR et à fort angle par rapport au grain structural de l'Abitibi s'étendent au-delà de la sous-province, recoupent les bassins de roches sédimentaires d'âge protérozoïque et sont corrélées à différents événements tectoniques de nature fragile qui ont évolué depuis le début du Protérozoïque.

Trois principaux systèmes de dykes spatialement organisés ont été reconnus dans la Caldeira de Misema :

- 1) Un système annulaire plurikilométrique précoce de dykes étroits et allongés forme régionalement une structure synvolcanique en pelure d'oignon orientée parallèlement aux couches volcaniques. Ce système de dykes, principalement localisé entre les failles internes et externes de la caldeira de Misema, est corrélé à l'étape précoce de la formation de cette mégacaldeira.
- 2) De plus petits systèmes annulaires kilométriques de dykes trapus formant des complexes intrusifs au coeur des structures synvolcaniques sont interprétés comme des centres volcaniques recoupant le système précoce.
- 3) Le dyke Horseshoe et son cortège de dykes en éventail associé représentent une structure arc-boutée plurikilométrique majeure en forme de point triple.

Les mines sont spatialement associées aux systèmes 1 et 3. Il pourrait s'agir de structures précoces et probablement plus profondes qui ont préparé la fertilité du camp et qui sont par conséquent des guides d'exploration régionale importants.

Une nouvelle méthode a été développée afin d'identifier de nouvelles failles, des prolongements de failles connues ou des dykes mafiques et intermédiaires considérés comme des failles. La méthode consiste à identifier des ruptures dans la maille des directions ou des pendages de la stratification S0. Ainsi, 153 probables nouvelles failles ou prolongements de failles ont été identifiés principalement dans le GBR Ouest. Cette méthode montre que de nombreux dykes sont en fait des failles synvolcaniques. En effet, ces intrusions délimitent des domaines de directions et/ou de pendages contrastés. Ils sont également associés spatialement avec des mines, indices ou altérations favorables de type volcanogène.

Une analyse en composantes principales (ACP) sur une population de failles connues et présentant diverses altérations géochimiques a permis d'isoler les assemblages associés aux minéralisations de type SMV. Les indices Ishikawa, pyrophyllite et Spitz-Darling sont associés statistiquement aux mines de métaux de base, à la présence de sulfures, d'indices de cuivre, de lentilles de SMV et des dykes mafiques et intermédiaires. Ces indices ont ensuite été recherchés dans l'ensemble de la banque de données des failles, soit les failles connues et les failles interprétées à partir de la méthode du maillage. Une conclusion importante de cette étude est que seule une minorité de failles sont considérées fertiles du point de vue de l'altération lithogéochimique. Sur un total de 830 failles connues et interprétées, seulement 168 failles (20% de la population globale) sont considérées fertiles. Ces failles sont essentiellement localisées dans l'enceinte des caldeiras de New Senator et de Noranda. Cependant, les failles les plus fertiles, au nombre de 52 (6% de la population globale), sont principalement associées au réseau de failles N070 du Camp Central, mais pas à celui de New Senator.

REFERENCES

- Barrett, T. J., MacLean, W. H., Cattalani, S., et Hoy, L. D. 1994. Géologie et géochimie du gisement de Corbet, région de Rouyn-Noranda, Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport ET-92-07, 62 p.
- Carracedo, J.C. 1994. The Canary Island: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 60, 225-241.
- Cattalani, S., Barrett, T. J. MacLean, W. H., Hoy, L. D. Hubert, C. et Fox, J. S. 1993. Métallogénie des gisements Horne et Quemont. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport ET-90-07, 121 p.
- Cattalani, S., MacLean, W. H., Barrett, T. J. Shriver, N. A. et Hoy, L. D. 1994. Géologie et géochimie du gisement de Norbec, région de Rouyn-Noranda. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport ET-92-01, 47 p.
- Cousineau, P. A. 1980. Stratigraphie et faciès des andésites Amulet, près de la mine Norbec, Rouyn Noranda. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 104 p.
- Cousineau, P. et Dimroth, E. 1982. Interpretation of the relations between massive, pillowed and brecciated facies in an Archean submarine andesite volcano – Amulet Andesite, Rouyn-Noranda, Canada. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 13: 83-102.
- de Rosen-Spence, A. F. 1976. Stratigraphy, development, and petrogenesis of the Central Noranda Volcanic pile, Noranda, Quebec. Thèse de Doctorat, Université de Toronto, 166p.
- Dieterich, J.H. 1988. Growth and persistence of Hawaiian volcanic rift zones. *J. Geophys. Res.*, 93, No. B5, 4258-4270.
- Dimroth, E., Cousineau, P., Leduc, M., et Sanschagrín, Y. 1978. Structure and organisation of the Archean subaqueous basalt flows, Rouyn-Noranda area, Quebec, Canada. *Journal canadien des Sciences de la Terre*, 16: 902-918.
- Dimroth, E., Imreh, L., Cousineau, P., Leduc, M. et Sanschagrín, Y. 1985. Paeogeographic analysis of mafic submarine flows and its use in the exploration for massive sulphide deposits. *In*: L.D. Ayres, P.C. Thurston, K.D. Card et W. Weber, éditeurs, *Evolution of Archean supracrustal sequences*, Geol. Ass. Can., Spec. Pap. 28, 203-222.
- Faure, S. et Jébrak, M. 1991. East-West compression in the Abitibi Greenstone Belt: A numerical approach. GAC-MAC Association géologique du Canada, programme et résumés, vol. 16, p.A36.
- Faure, S., Tremblay, A. et Angelier, J. 1996. State of intraplate and tectonism of northeastern America since Cretaceous time, with particular emphasis on the New England-Québec igneous province. *Tectonophysics*, 225: 111-134.
- Franklin, J. M., Lydon, J. W. Et Sangster, D.F. 1981. Volcanic-associated massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 75th anniversary volume, p. 485-627.
- Franklin, J. M. 1993. Volcanic-associated massive sulphide deposits. *In* : Kirkham, R. V., Sinclair, W. D., Thorpe, R. I., and Duke, J. M., éditeurs. *Mineral deposit modeling*. Association géologique du Canada, Special Paper 40: 315-334.

- Franklin, J. M. 1997. Lithochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration. *In Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration* A.G. Gubins, éditeur, 191-208.
- Franklin, J.M, Gibson, H.L., Jonasson, I.R. et Galley, A.G., 2005. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology, 100th Anniversary Volume, The Economic Geology Publishing Company*, p. 523-560.
- Galley, A. G., 1993. Semi-conformable alteration zones in volcanogenic massive sulphide districts: *Journal of Geochemical Exploration*, 48: 175-200.
- Galley, A. G., Jonasson, I. R. et Watkinson, D. H. 2000. Magnetite-rich calc-silicate alteration in relation to synvolcanic intrusion at the Ansil volcanogenic massive sulfide deposit, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada. *Mineralium Deposita*, 35: 619-637.
- Gibson, H. L. 1983. Série de cartes manuscrites, annotées et inédites de Noranda Exploration couvrant le Camp de Noranda.
- Gibson, H. L. 1989. The mine sequence of the central Noranda volcanic complex: Geology, alteration, massive sulphide deposits and volcanological reconstruction. Thèse Ph. D., Université Carleton, Ottawa, Ont., 715 p.
- Gibson, H. L. et Watkinson, D. H. 1990. Volcanogenic massive sulphide deposits of the Noranda Caldera and Shield volcano, Quebec. *In Rive, M. Verpaest, P. Gagnon, Y. Lulin, J. M. Riverin, G. et A. Simard, éditeurs, The Northwestern Quebec Polymetallic Belt : Canadian Institute of Mining and Metallurgy, CIM, Spec. Vol. 43 : 119-132.*
- Gibson, H. L., Watkinson, D. H., Watkins, J. J., Labrie, M., et Doiron, G., 1993. Volcanological reconstruction of the Corbet breccia pile, and Cu-Zn massive sulfide deposit, Noranda, Quebec. *Explor. Mining Geol.* 2: 1-16.
- Gibson, H. L., Morton, R. L. et Hudak, G. J. 1997. Submarine volcanic processes, deposits, and environments favourable for location of volcanic-associated massive sulfides deposits. *In Volcanic-associated massive deposits: Processes and examples in modern and ancient settings*, T. C. Barrie and Hannington, M. D. editeurs, p.13-51.
- Guillou-Frottier, L., Burov, E.B., et Milési, J.-P. 2000. Genetic links between ash-flow calderas and associated ore deposits as revealed by large-scale thermo-mechanical modeling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102: 339–361.
- Kennedy, L. P. 1984. The geology and geochemistry of the Archean Flavrian Pluton, Noranda, Quebec. Thèse de Doctorat (Ph. D.) Université Western Ontario, London, Ontario.
- Morton, R. L. et Franklin, J. M. 1987. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulfide deposits. *Economic Geology* 82: 1057-1063.
- Mueller, W. U., Friedman, R., et Mortensen, J. K. 2007. Nouveaux développements sur l'évolution du Groupe de Blake River en Abitibi. *Exploration et Géosciences Abitibi 2007*, recueil de résumés, p. 14.
- OGS, Ontario Geological Survey, 2005. Integrated GIS Compilation of Geospatial Data from the Abitibi Greenstone Belt, Northeastern Ontario: Discover Abitibi Initiative. MRD 186.
- Pearson, V. 1994. Propriété FLAG (PN69170) - Synthèse 1989-1994. Metal Mining Corporation, Rapport interne, 147 pages.

- Pearson, V. 2006. Un nouveau modèle d'exploration pour le Groupe de Blake River en Abitibi. Bulletin du CONSOREM, Novembre 2006, p. 2.
- Pearson, V. et Daigneault, R. 2009. An Archean megacaldera complex: The Blake River Group, Abitibi greenstone belt. *Precambrian Research*, 168(1-2): 66-82.
- Percival, J. A., et McGrath P.H. 1986. Deep crustal structure and tectonic history of the northern Kapuskasing uplift of Ontario: an integrated petrological-geophysical study. *Tectonics*, 5: 553-572.
- Piché, M. et Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 82: 59-77
- Riverin, G. 1989. La géologie du gisement Ansil, Rouyn-Noranda (Québec). *In* : Nouveaux horizons pour l'exploration, DV 89-07, MRNF, p.40.
- Riverin, G. et Hodgson, C. J. 1980. Wall-rock alteration at the Millenbach Cu-Zn Mine, Noranda, Quebec. *Economic Geology*, 75: 424-444.
- Ryan, M.P. 1988. The mechanics and three-dimensionnal structure of active magmatic system: Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 93, No. B5, 4213-4248.
- Santaguida, F., Gibson, H. L., Galley, A. G., Hannington, M. H. et Watkinson, D. H. 1997. The geology and stratigraphy of the Central Noranda Volcanic Complex. *Compilation Map*, 1:25000. CAMIRO Project 94E07 1996-97 Annual Report.
- Santaguida, F., Gibson, H.L., Watkinson, D.H., et Hannington, M.D. 2002. Part I: Semi-conformable epidote-quartz hydrothermal alteration in the Central Noranda Volcanic Complex, Canada: Relationship to volcanic activity and VMS mineralization. *Commission géologique du Canada, Open File 4431*, 139-180.
- Setterfield, T. 1987. Massive and brecciated dikes in the McDougall and Despina faults, Noranda, Quebec, Canada. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31: 87-97.
- Setterfield, T. N., Hodder., R.W., Gibson, H.L. et Watkins, J.J. 1995. The McDougall-Despina fault set, Quebec: Evidence for fault-controlled volcanism and hydrothermal fluid flow. *Explor. Min. Geol.*, 4: 381-393.
- Smith, R.P. 1987. Dyke emplacement at Spanish Peaks, Colorado. *In*: H.C. Halls and W.F. Fahrig eds. *Mafic dyke swarms. Geol. Ass. Can., Spec. Pap. 34*, 47-54.
- Taylor, B. 2007. Searching for VMS Deposits: Isotopic Mapping and Exploration of Submarine Hydrothermal Systems. *Conférence UQAM*, 22 Novembre.
- Walker, G.P.L. 1999. Volcanic rift zones and their intrusion swarms. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 94, 21-34.
- Yang, J. 2006. Full 3-D numerical simulation of hydrothermal fluid flow in faulted sedimentary basins: Example of the McArthur Basin, Northern Australia. *Journal of Geochemical Exploration* 89 : 440-444.
- Yang, J. et Radulescu, M. 2006. Paleo-fluid flow and heat transport at 1575 Ma over an E-W section in the Northern Lawn Hill Platform, Australia: Theoretical results from finite element modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 89 : 445-449.

CAHIER DE FIGURES

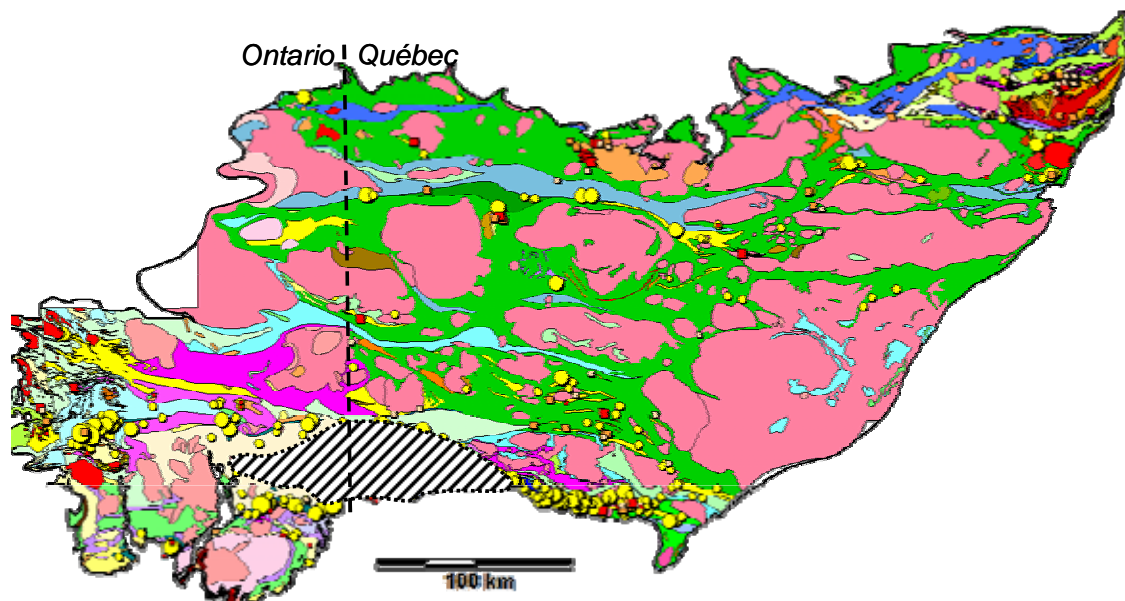


Figure 1 : Localisation du Groupe de Blake River (hachuré) dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, avec en rose les plutons, en vert les volcanites, en bleu les sédiments, en mauve les ultramafites, les mines d'or représentées par des points jaunes et les gisements de Cu et/ou Zn par des carrés oranges et rouges. [Retour au texte](#)

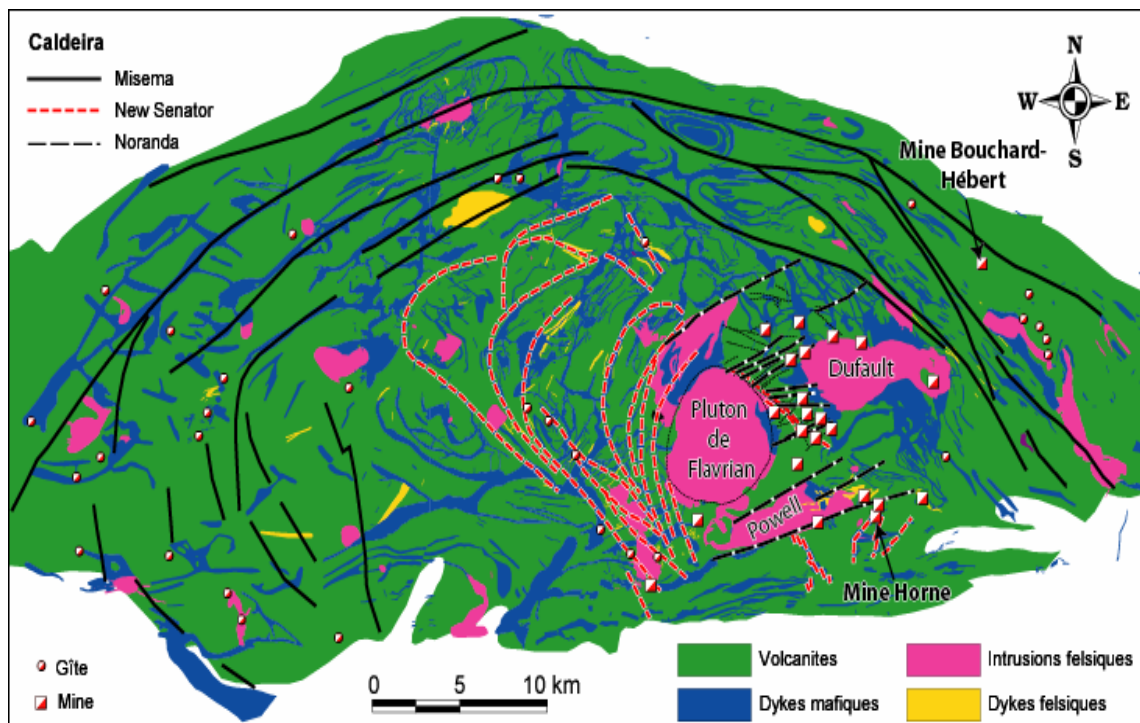


Figure 2 : Principaux éléments de la Caldeira de Misema (modifié de Pearson 2006) et failles majeures associées aux caldeiras Misema, New Senator et Noranda. [Retour au texte](#)

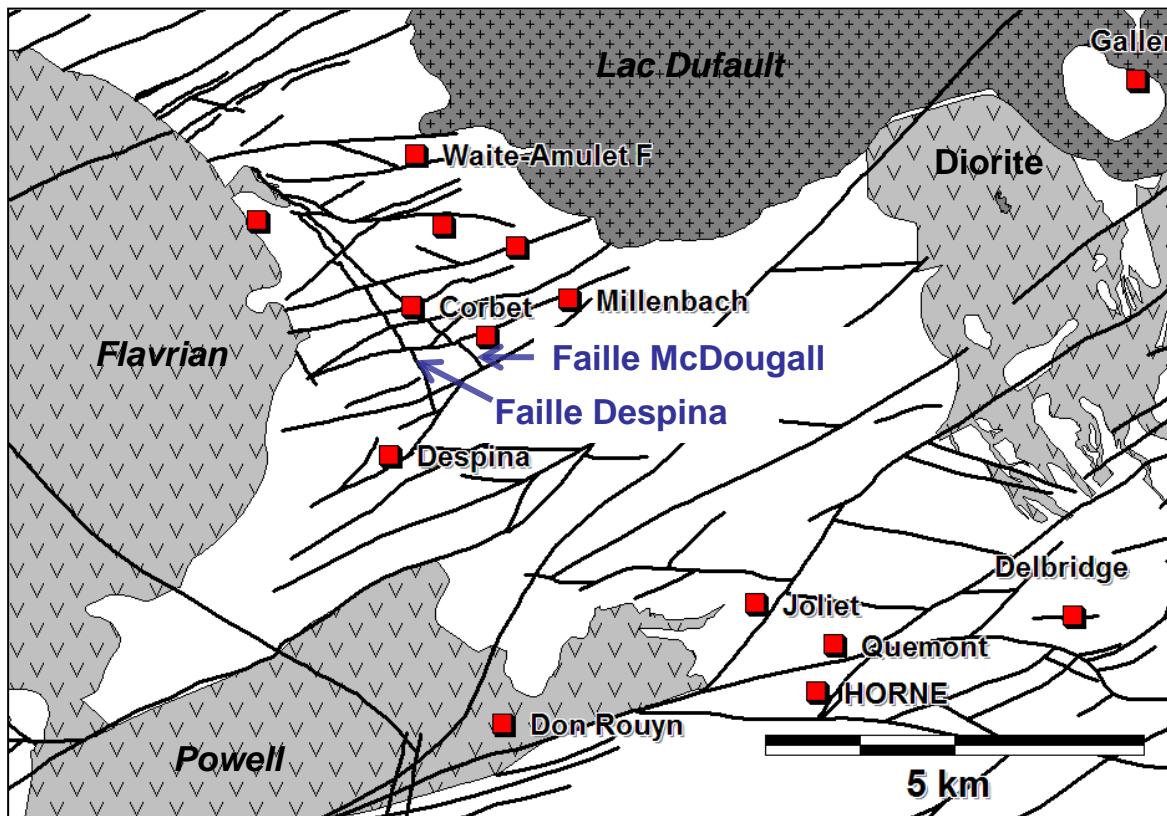


Figure 3 : Localisation des failles synvolcaniques Despina et McDougall avec les gisements de SMV du Camp Central et le nom des intrusions (en italique). [Retour au texte](#) ; [section 2.3](#)

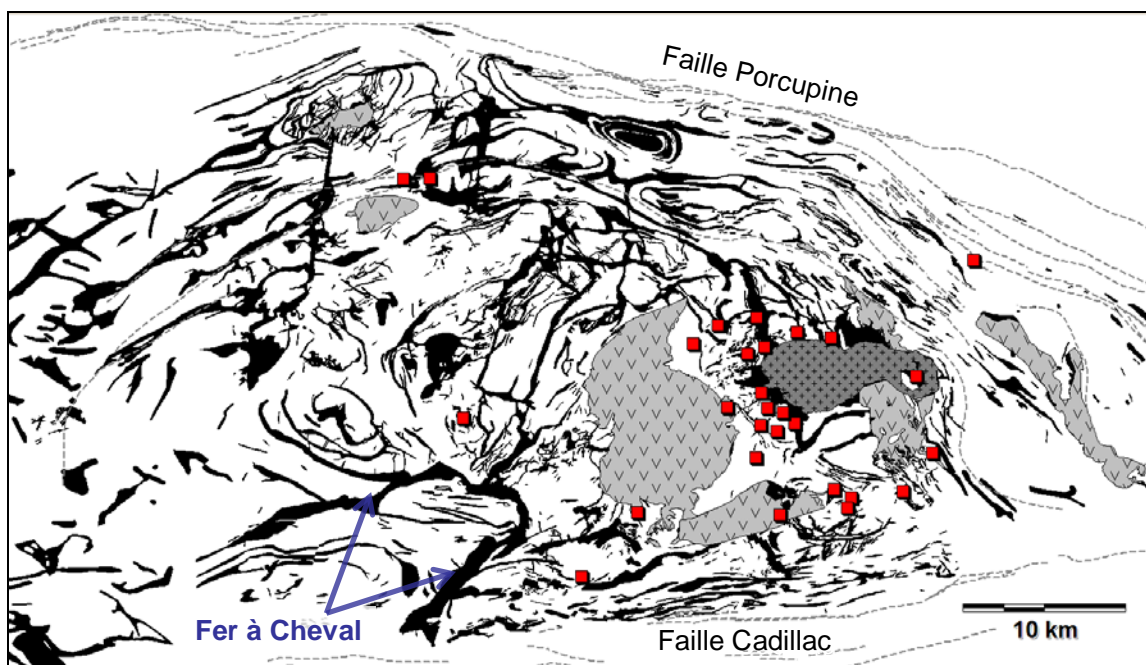


Figure 4 : Complexe de dykes synvolcaniques de composition mafique à intermédiaire de la Caldeira Misema (Modifié de Pearson et Daigneault, 2009). [Retour au texte](#)

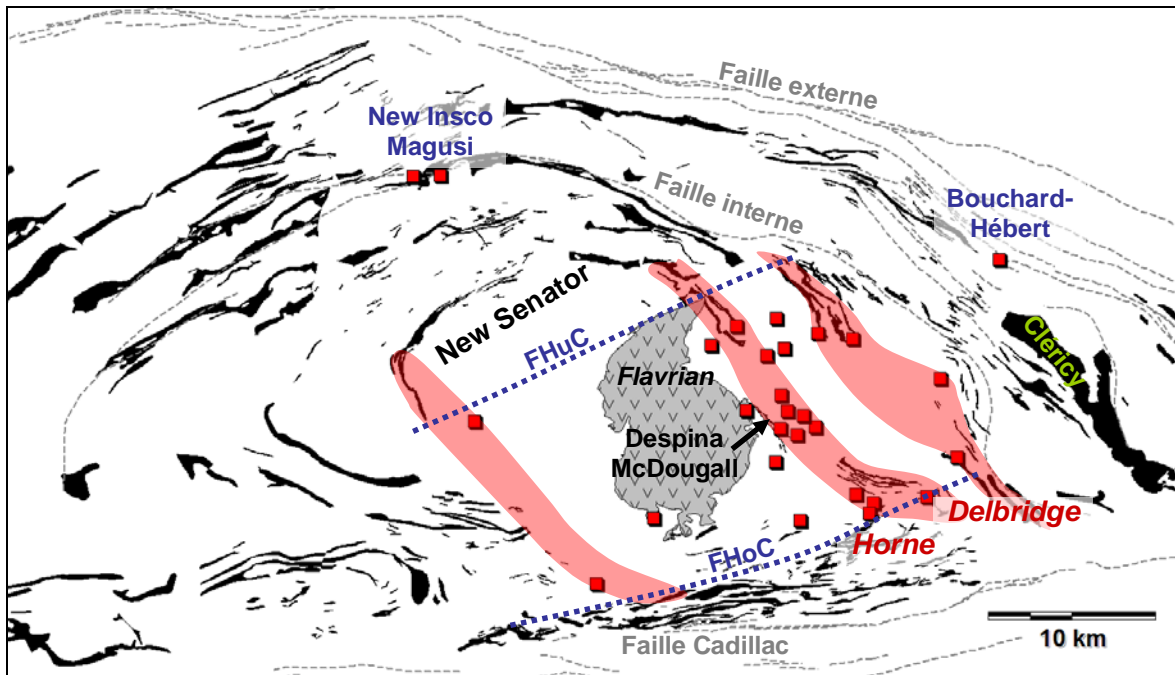


Figure 5 : Réseau de dykes annulaires et précoces de la Caldeira de Misema (en noir) en relation avec les principales failles (tirets gris). Carrés rouges : gisements de SMV. Surfaces profondes interprétées de New Senator et précurseurs des minéralisations du Camp Central. HoCF : faille Horne Creek. HuCF : faille Hunter Creek. [Retour au texte](#)

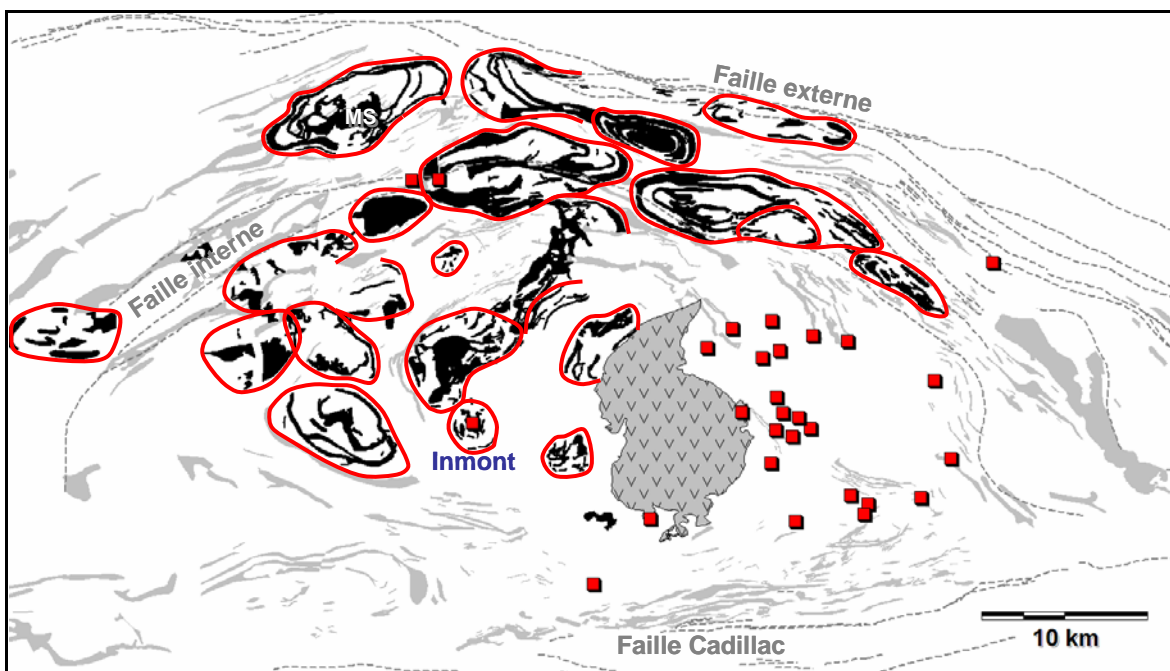


Figure 6 : Réseaux de dykes concentriques (en noir) interprétés comme des centres volcaniques et des sommets de caldeiras (lignes rouges) et superposés sur le réseau précoce de dykes annulaires (en gris). MS : pluton de Monsabrais. [Retour au texte](#)

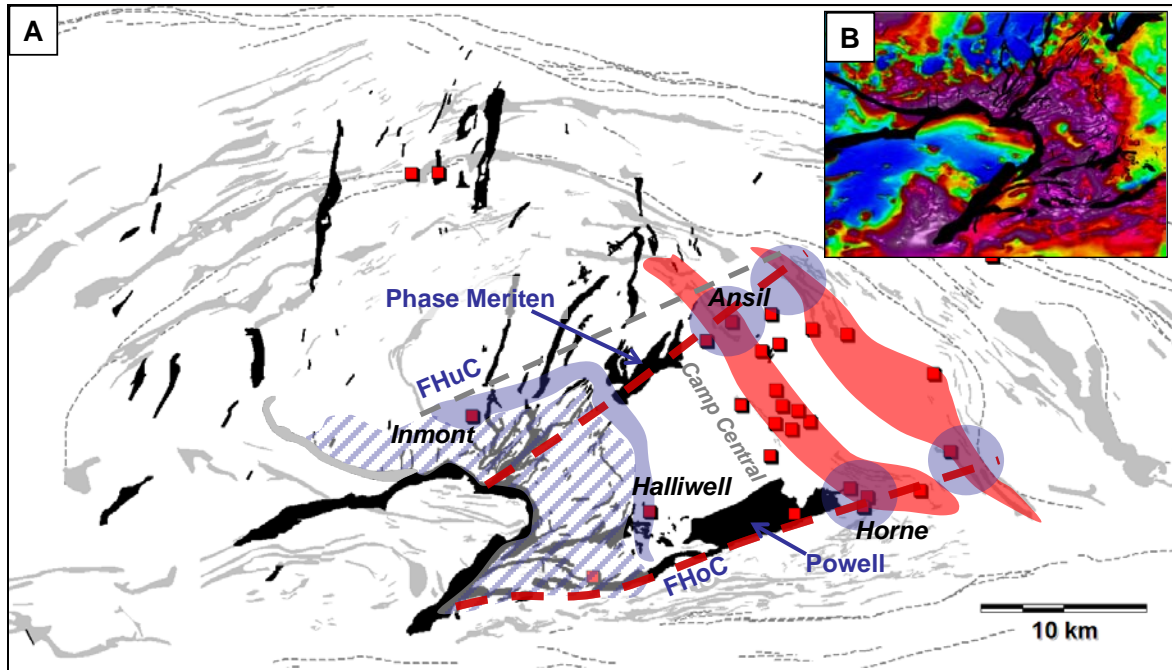


Figure 7 : A) Structure du Horseshoe et cortège de dykes associés (en noir). Surfaces rouges : structures profondes de New Senator précurseurs des minéralisations du Camp Central. Surfaces bleues : cibles potentielles de SMV. HoCF : faille Horne Creek. HuCF : faille Hunter Creek. B) Anomalie magnétique (champ total) représentée par les hachures bleues en A (données magnétiques de Xstrata Copper). [Retour au texte](#) ; [section 3.2.3.1](#)

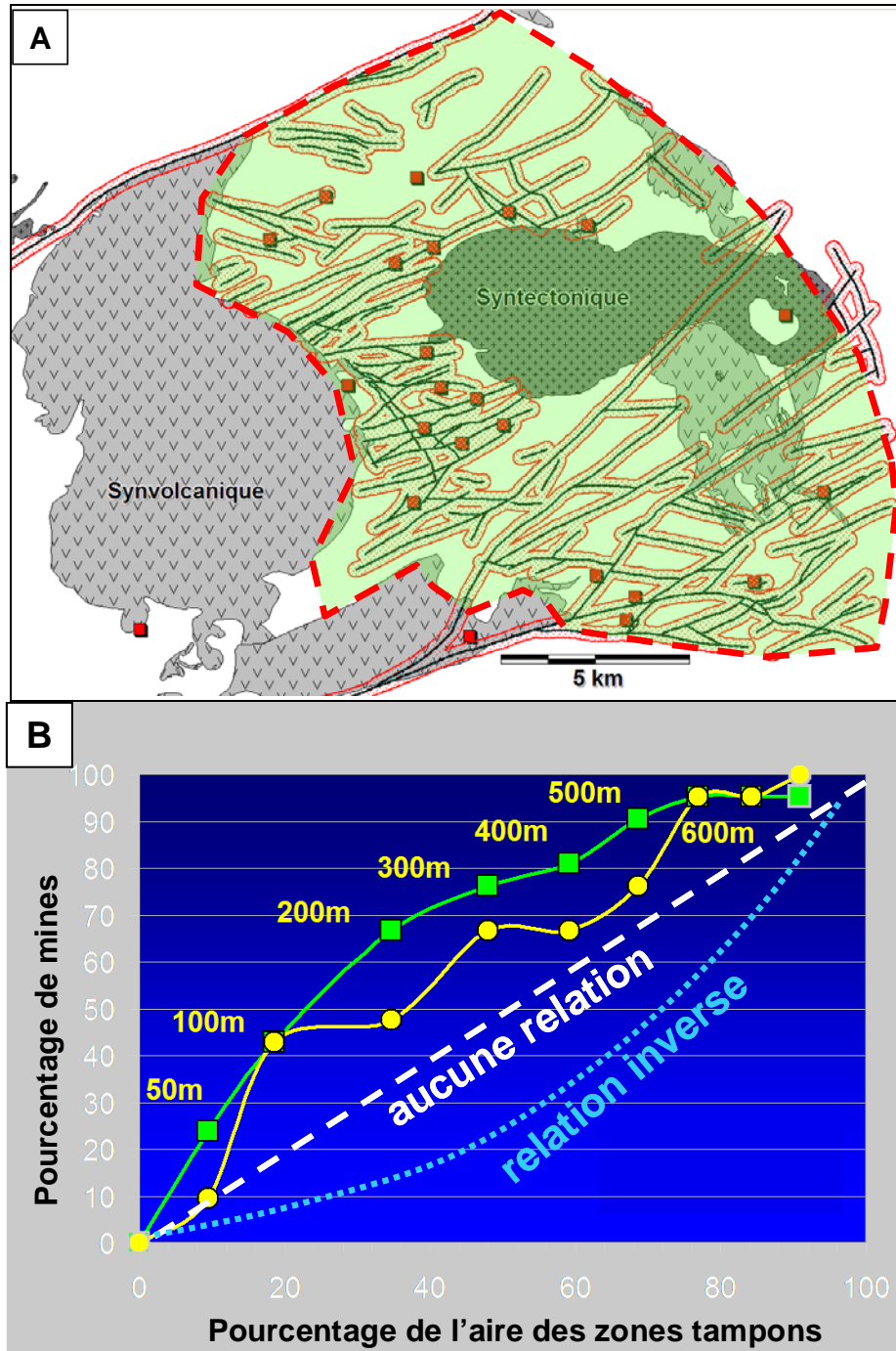


Figure 8 : Test statistique montrant la réelle organisation des mines par rapport à la distance aux failles dans le Camp Central. A) Zones tampons de 200 mètres autour des failles avec la position réelle des mines (carrés rouges) et l'aire totale de la région considérée pour le test (en vert). B) Graphique montrant le pourcentage qu'occupe les aires des zones tampons par rapport à l'aire totale de la région considérée en A, et le pourcentage cumulé de mines de la population réelle (ligne et carrées en vert) et d'une population aléatoire de mines virtuelles (ligne et cercles en jaune). [Retour au texte](#)

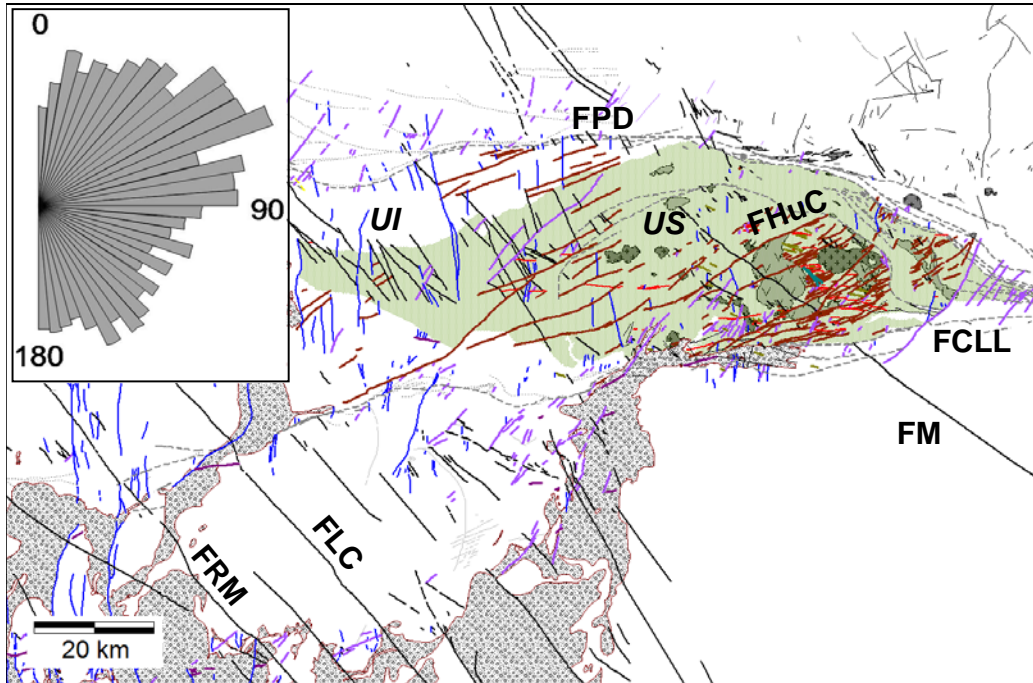


Figure 9 : Les différentes familles de failles recoupant le groupe de Blake River (*US* : unité supérieure du Groupe de Blake River en vert; *UI* : unité inférieure) avec la distribution statistique (rosace) des failles dans ce groupe et les sédiments du Protérozoïque (surface pointillée). Faille Porcupine-Destor (FPD), Faille Cadillac – Larder Lake (FCLL), Faille Hunter Creek (FHuC), Faille Mouilleuse (M), Faille de la Rivière Montréal (FRM), et Faille du Lac Cross (FLC). [Retour au texte](#) ; [section 3.1](#)

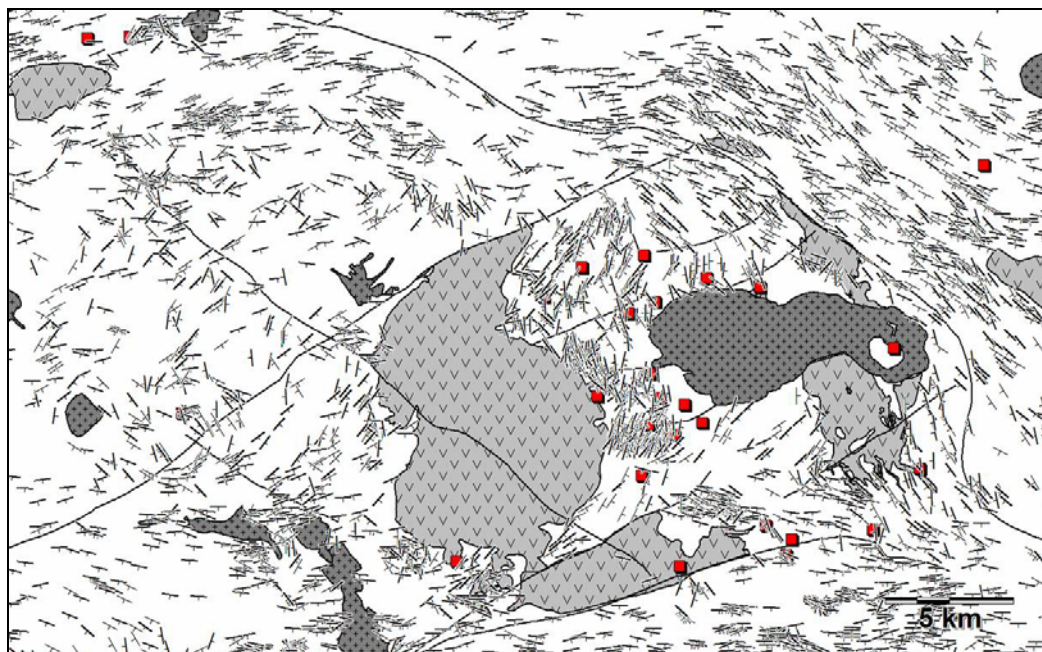


Figure 10 : Partie centrale de la compilation des 5708 données de direction de S_0 et des directions de 1585 conducteurs EM formationnels, dans le Groupe de Blake River. Source : SIGEOM, cartes de compilation, partenaires CONSOREM. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé) avec les principales failles en noir. [Retour au texte](#) ; [section 3.2.3.1](#)

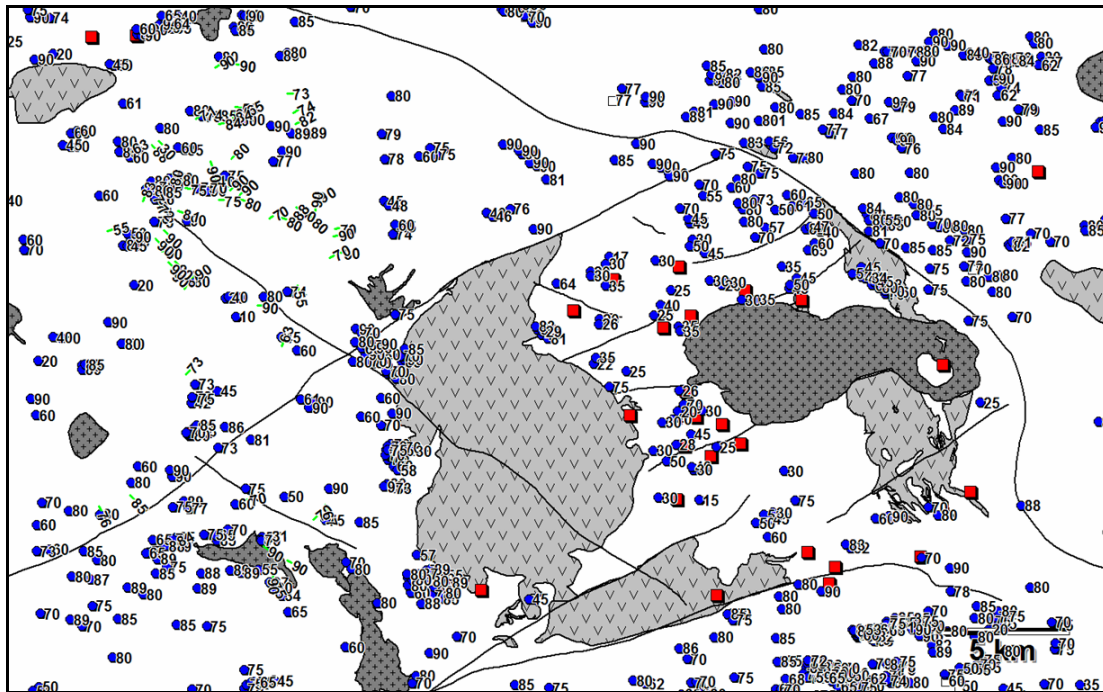


Figure 11 : Partie centrale de la compilation des 1909 données de pendages de S0 dans le Groupe de Blake River. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé). [Retour au texte](#)

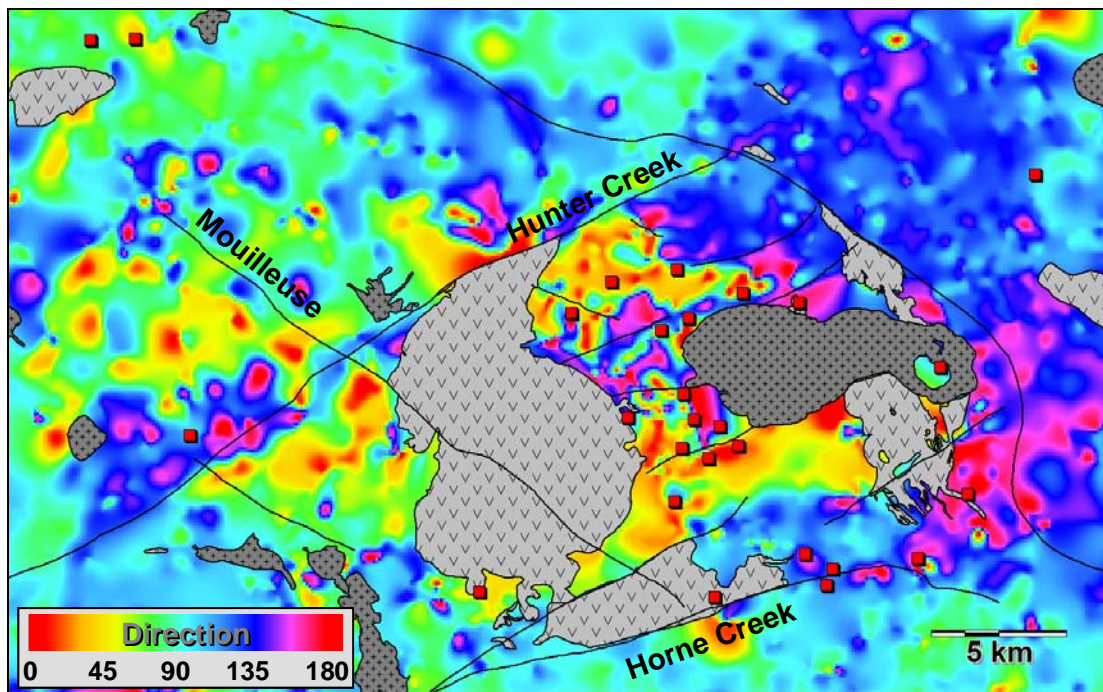


Figure 12 : Directions de S0 et de conducteurs électromagnétiques de la figure 10 maillées par la méthode des voisins naturels avec les principales failles dans le centre du Groupe de Blake River, côté Québec. Noter les ruptures nettes et contrastées de la maille le long des failles connues du Camp Central. Mines de métaux de base (carrés rouges). [Retour au texte](#)

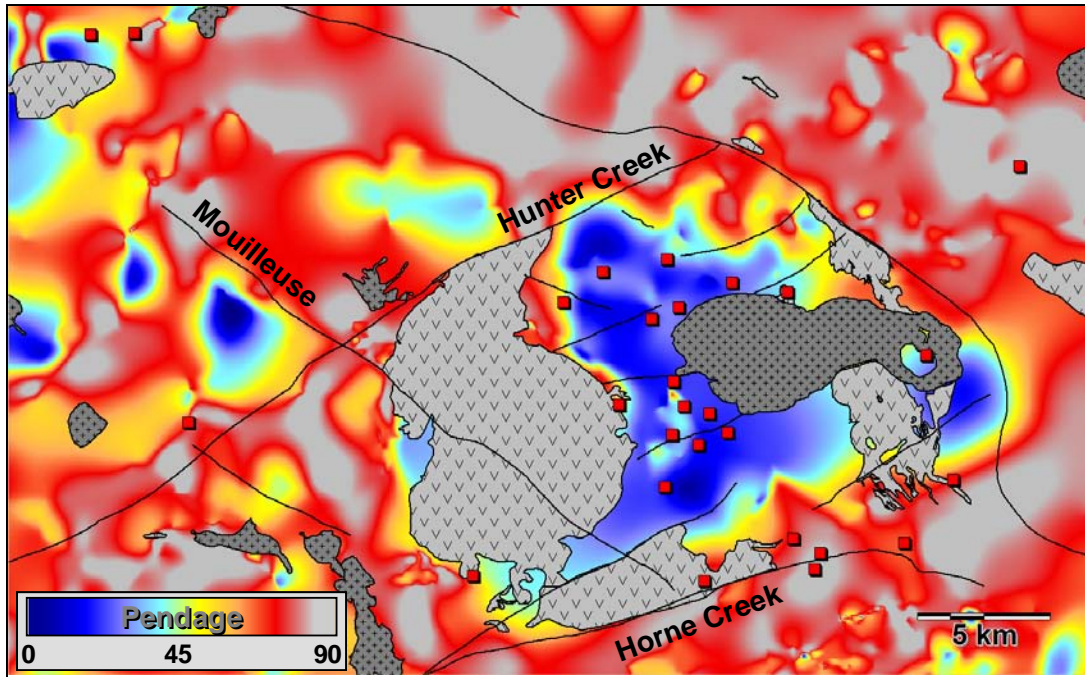


Figure 13 : Pendages de S0 maillés par la méthode des voisins naturels avec les principales failles dans le centre du Groupe de Blake River. Noter la plus faible résolution des données par rapport à celle obtenue avec les directions de S0. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé). [Retour au texte](#)

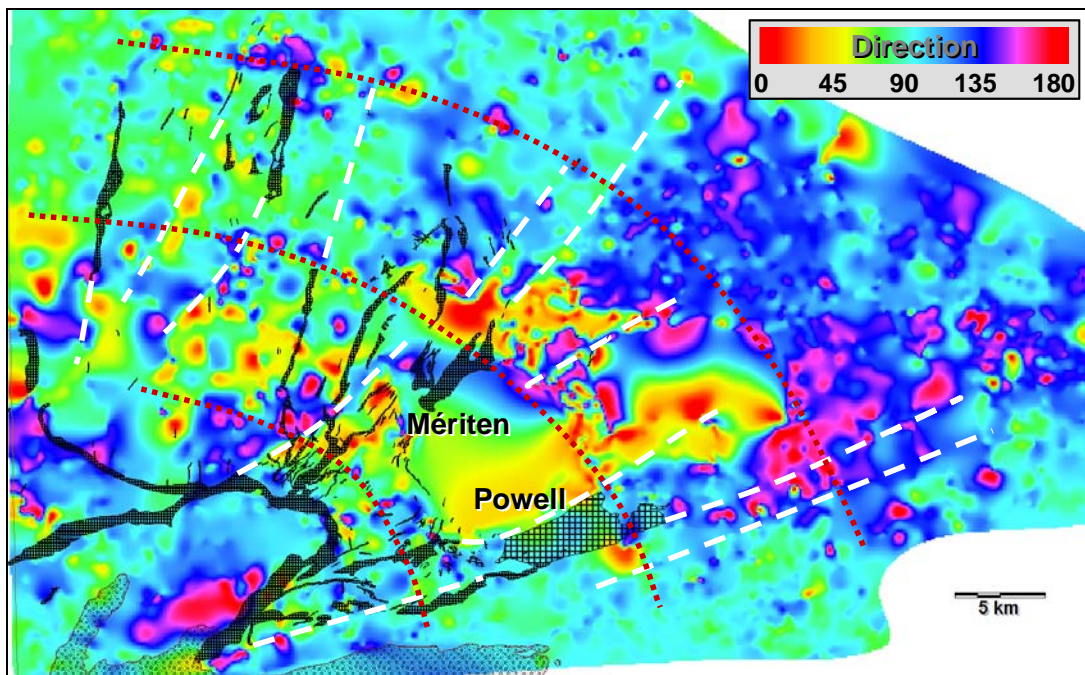


Figure 14 : Complexe intrusif du Horseshoe et principales ruptures dans la maille des directions de S0 (tirets blancs). À noter que la plupart de ces ruptures correspondent aux extrémités de dykes mafiques et intermédiaires en éventail. Trajectoire de la contrainte minimale sigma 3 horizontale (tirets rouges). [Retour au texte](#)

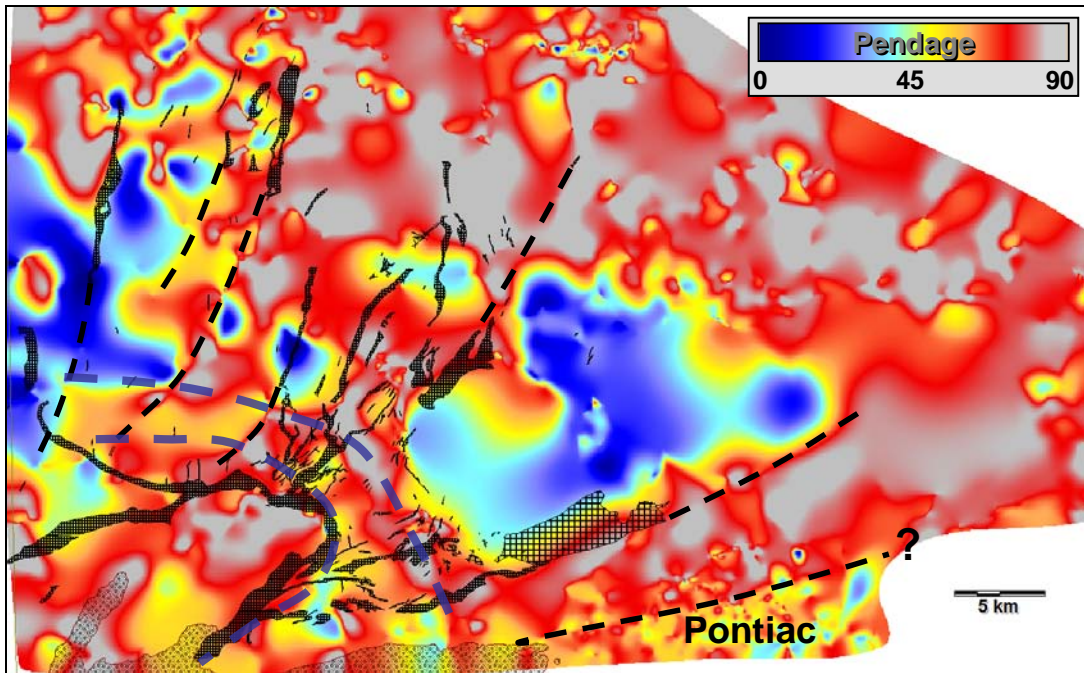


Figure 15 : Complexe intrusif du Horseshoe et principales ruptures dans la maille de pendage de S0 aux extrémités de dykes mafiques et intermédiaires (traits noirs). Couronne externe au Horseshoe (traits bleus) soulignant des valeurs moyennes de pendage à 70 ± 10 degrés. [Retour au texte](#)

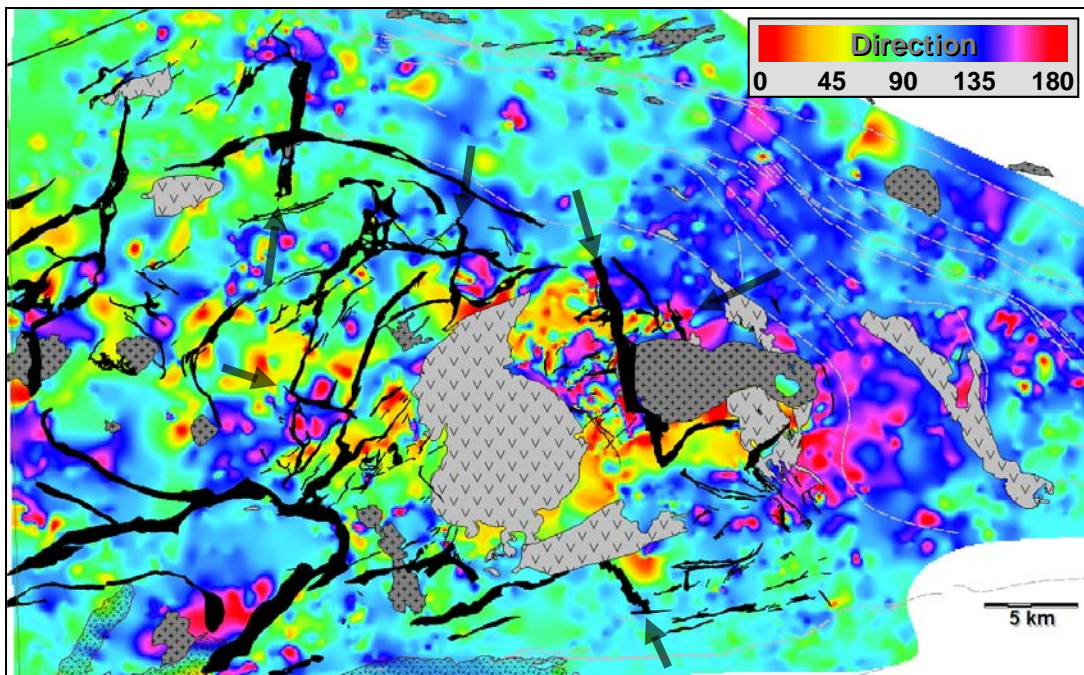


Figure 16 : Synthèse des dykes qui montrent des ruptures significatives dans la maille de direction et/ou de pendage de S0 et qui sont considérés comme des failles synvolcaniques. Les flèches noires indiquent les dykes limitant des domaines très contrastés de direction. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé). [Retour au texte](#)

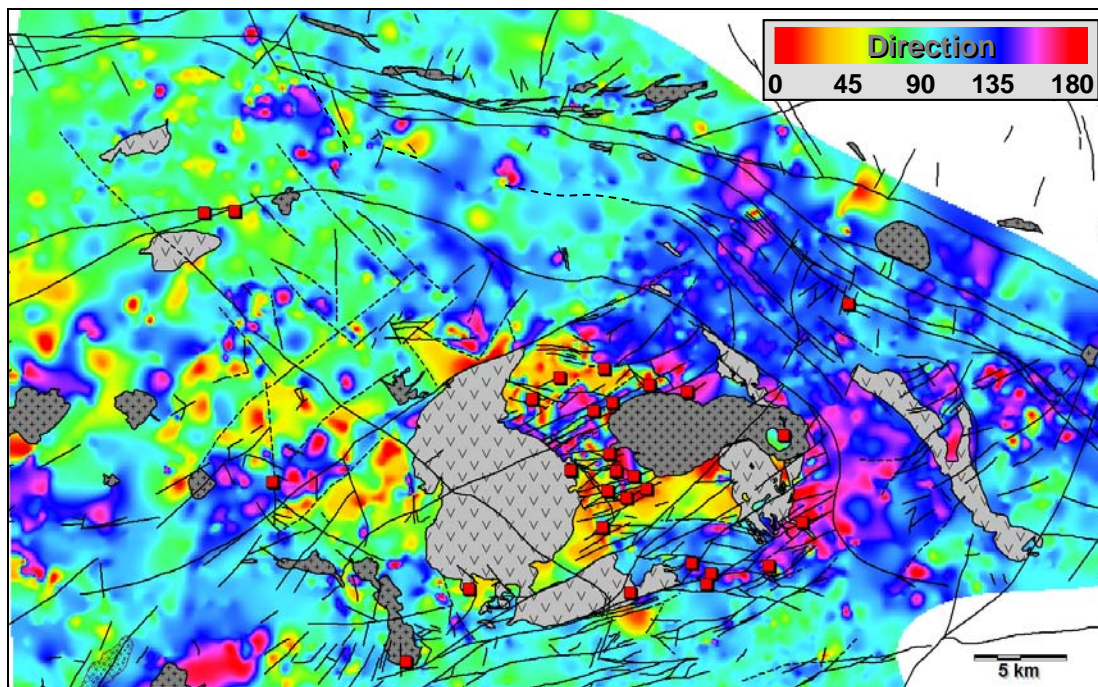


Figure 17 : Les 57 prolongements de failles (tirets noirs) interprétés sur la rupture de la maille des directions de S0 et les failles connues (lignes noires). Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé), mines de SMV (carrés rouges). [Retour au texte](#)

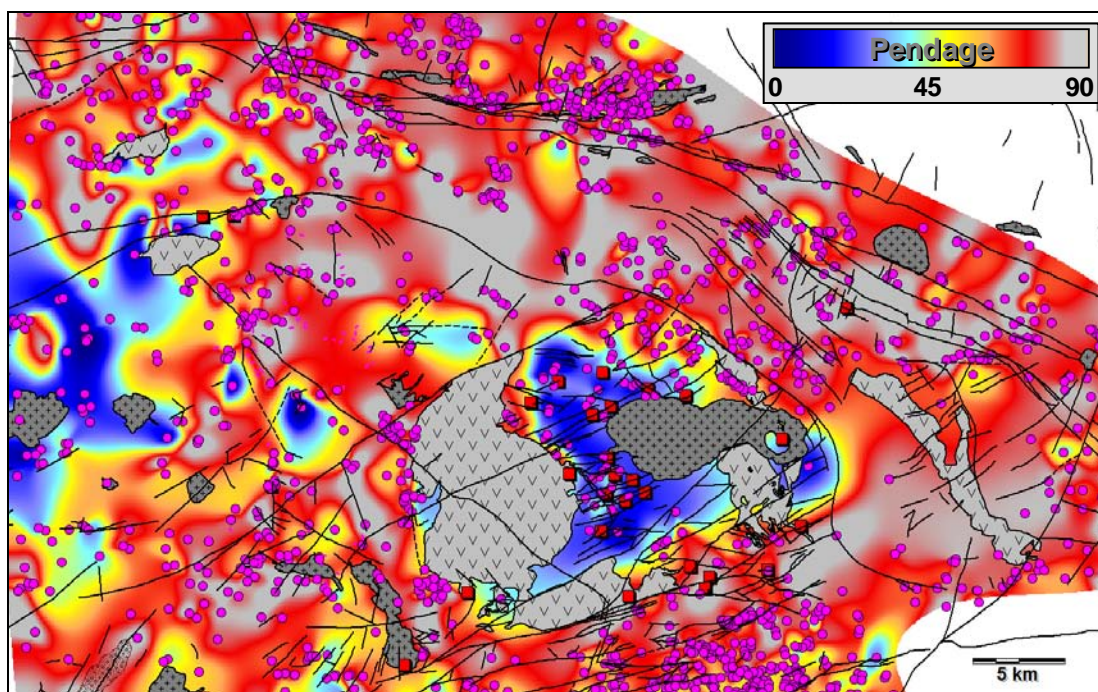


Figure 18 : Les 13 prolongements de failles (tirets noirs) interprétés sur la rupture de maille des pendages de S0 et les failles connues (lignes noires). Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé), mines SMV (carrés rouges), points de contrôle du pendage (cercles mauves). [Retour au texte](#)

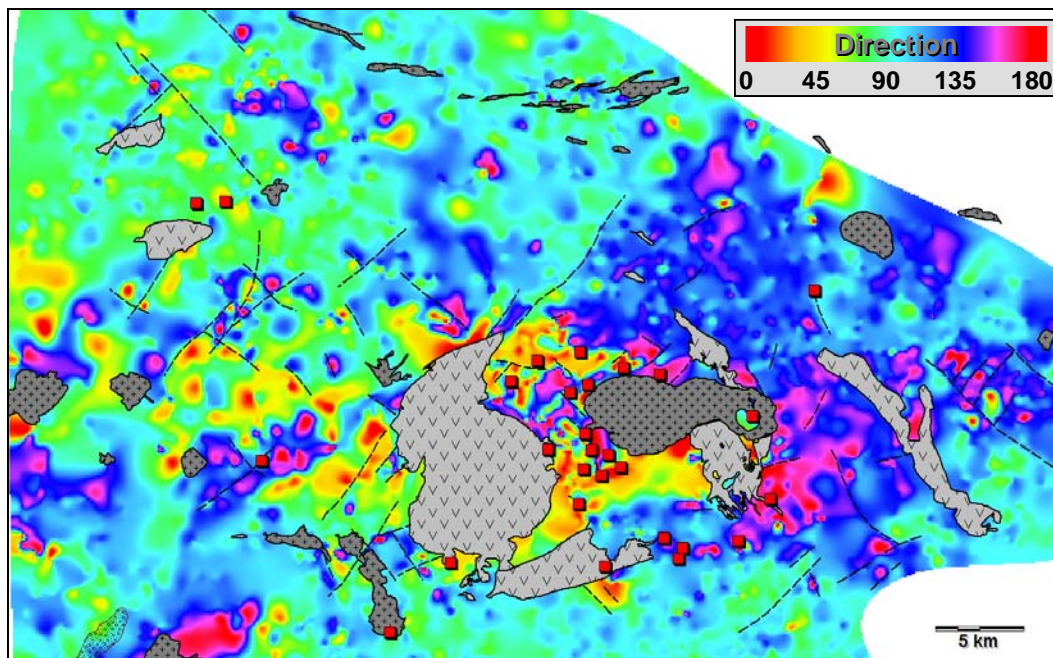


Figure 19 : Les 68 nouvelles failles (tirets noirs) interprétées sur la rupture de la maille des directions de S0. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé), mines de SMV (carrés rouge). [Retour au texte](#)

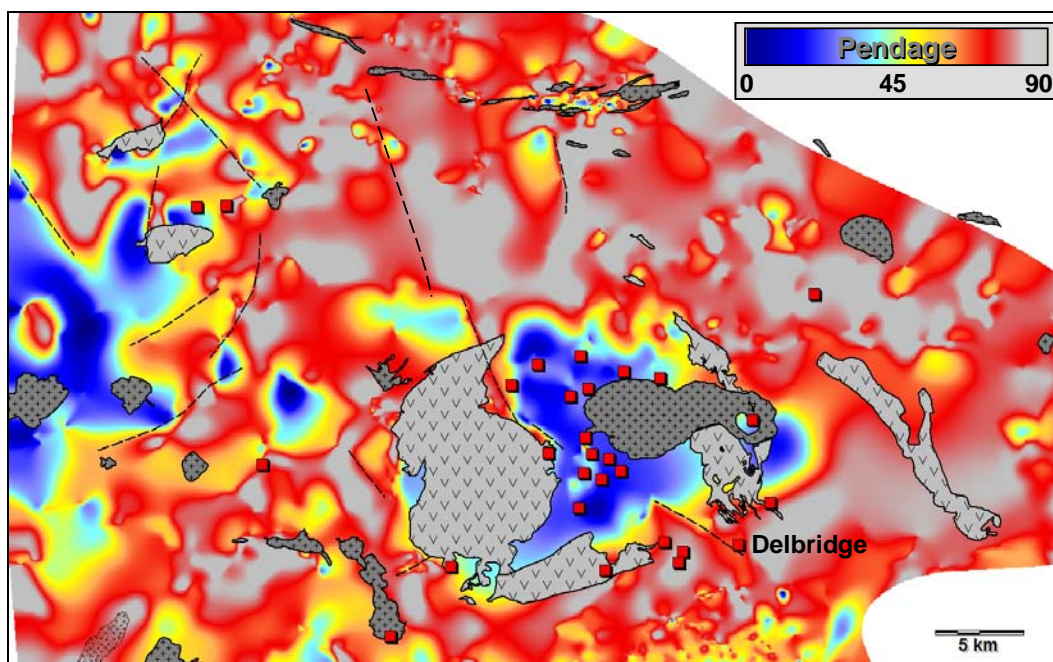


Figure 20 : Les 13 nouvelles failles (tirets noirs) interprétées sur la rupture de maille des pendages de S0. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé), mines de SMV (carrés rouge). [Retour au texte](#)

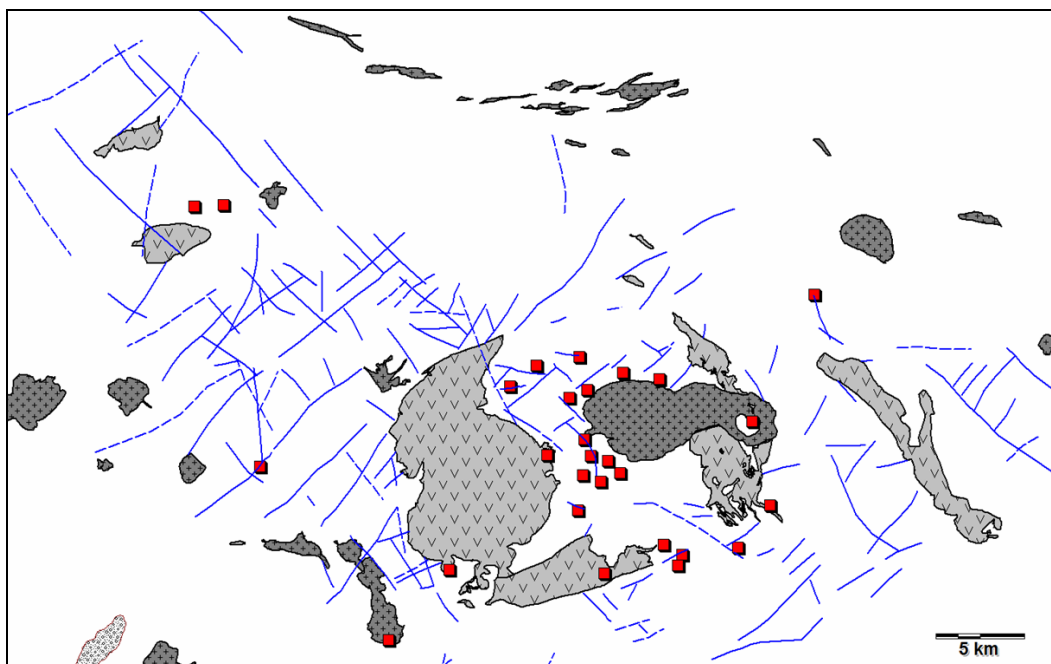


Figure 21 : Carte synthèse montrant les 153 nouvelles failles interprétées à partir des mailles des directions (lignes bleues) et des pendages (tirets bleus) de S0. Intrusions synvolcaniques (gris clair) et syntectoniques (gris foncé), mines de SMV (carrés rouges). [Retour au texte](#)



Figure 22 : Les 81 prolongements de failles connues déduits à partir d'un modèle numérique d'élévation de terrain de la compagnie Xstrata Copper. Roches protérozoïques (gris foncé). [Retour au texte](#)

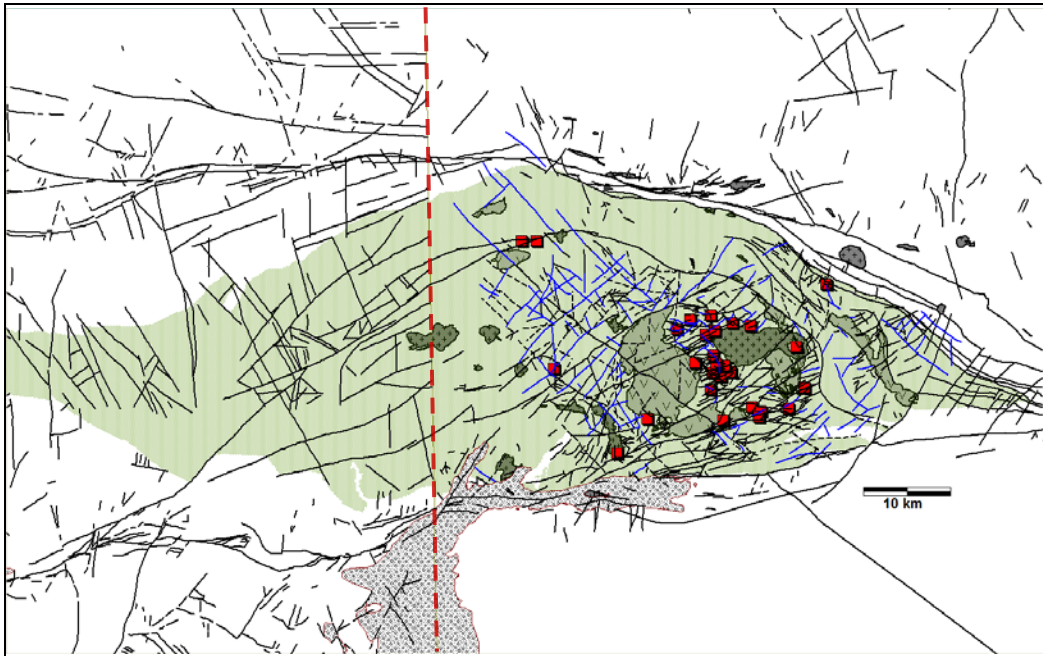


Figure 23 : Carte synthèse montrant le bilan des nouvelles failles et des prolongements de failles dans la partie québécoise du Blake River (unité supérieure en vert) : nouvelles failles sur la base des mailles de S0 (lignes bleues), prolongements de failles (tirets noirs), failles connues (lignes noires) et frontière entre le Québec et l'Ontario (tirets rouges). [Retour au texte](#)

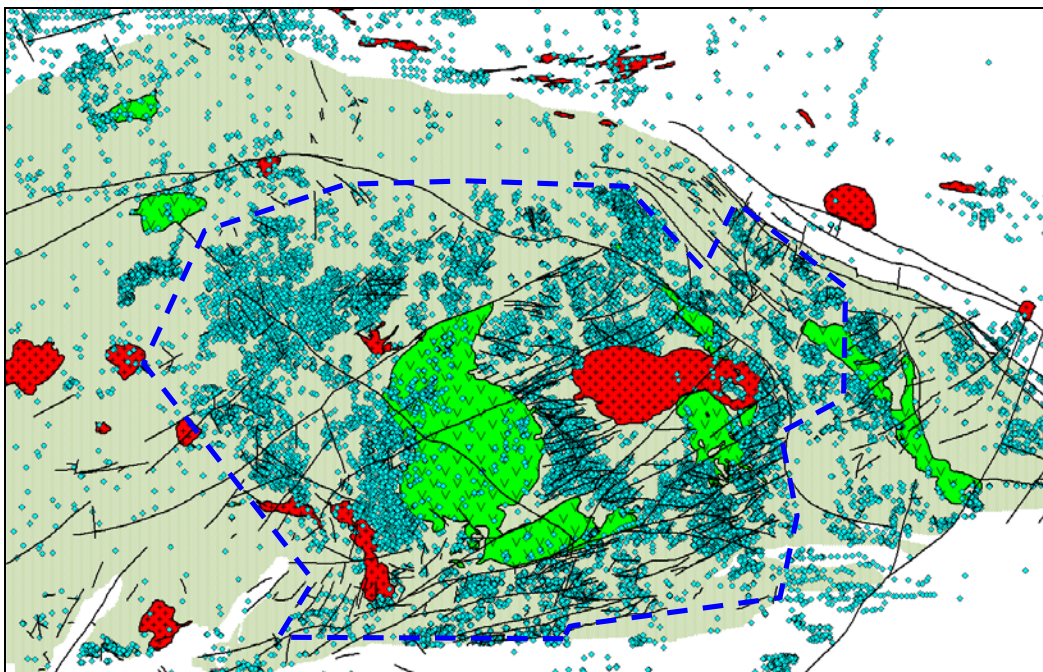


Figure 24 : Distribution dans le Groupe de Blake River (surface en vert) des 28 757 échantillons géochimiques utilisés pour déterminer la fertilité des altérations en bordure des failles. La région de forte densité d'échantillons est délimitée par les tirets bleus. Intrusions synvolcaniques (vert) et syntectoniques (rouge). [Retour au texte](#)

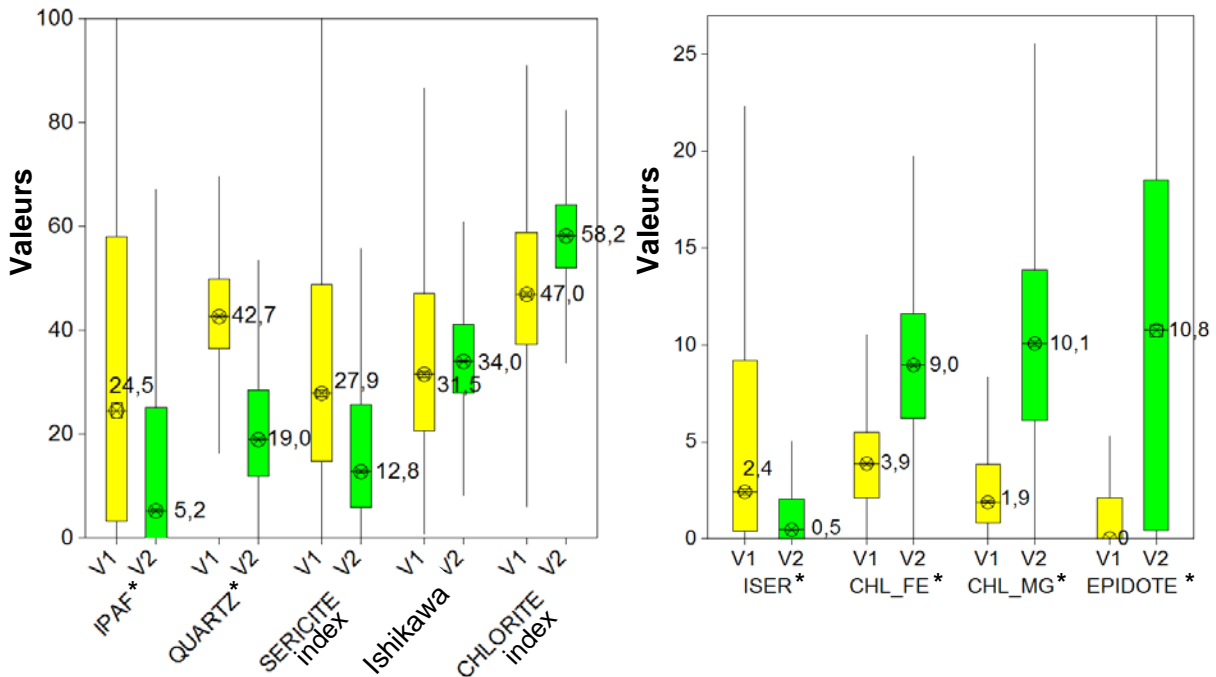


Figure 25 : Boîtes à moustaches montrant les variations des valeurs médianes (chiffres à l'intérieur des graphiques) d'indices et de minéraux normatifs (*NORMAT) et d'indices géochimiques calculés pour des groupes de roches rhyolitiques (colonnes jaunes) et andésitiques (colonnes vertes) de la banque de données. Chaque boîte montre les 25 et 75 centiles. [Retour au texte](#)

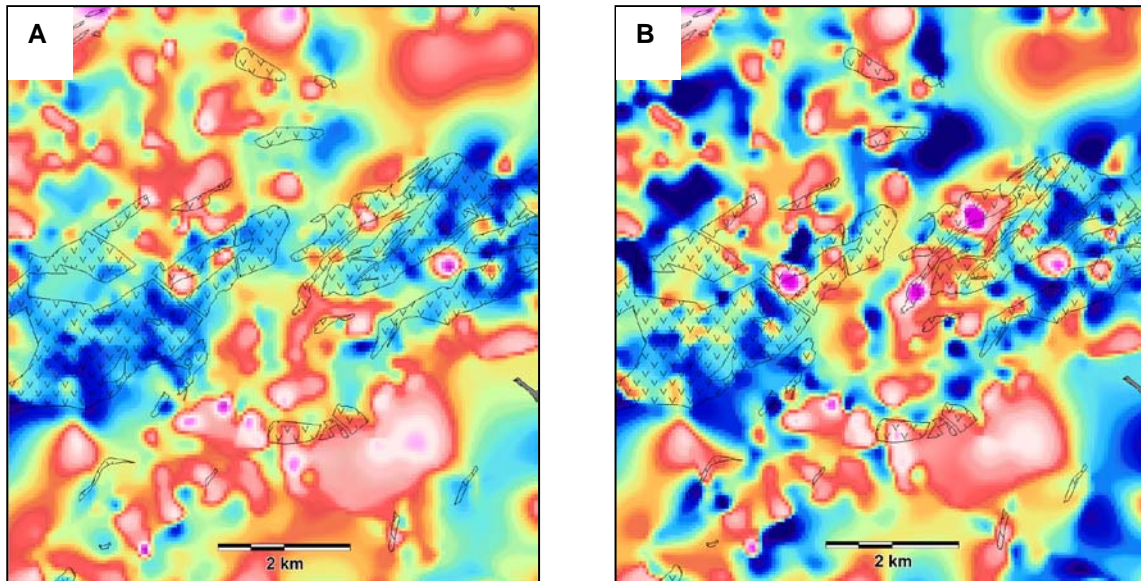


Figure 26 : Cartes maillées dans le Blake River Ouest de l'altération en épidoite normative (calcul NORMAT) avec la position des rhyolites V1 (trame avec v) et des andésites V2 (aucune trame) avant (A) et après (B) la normalisation des données par rapport aux lithologies V1 et V2 (Figure 25). [Retour au texte](#)

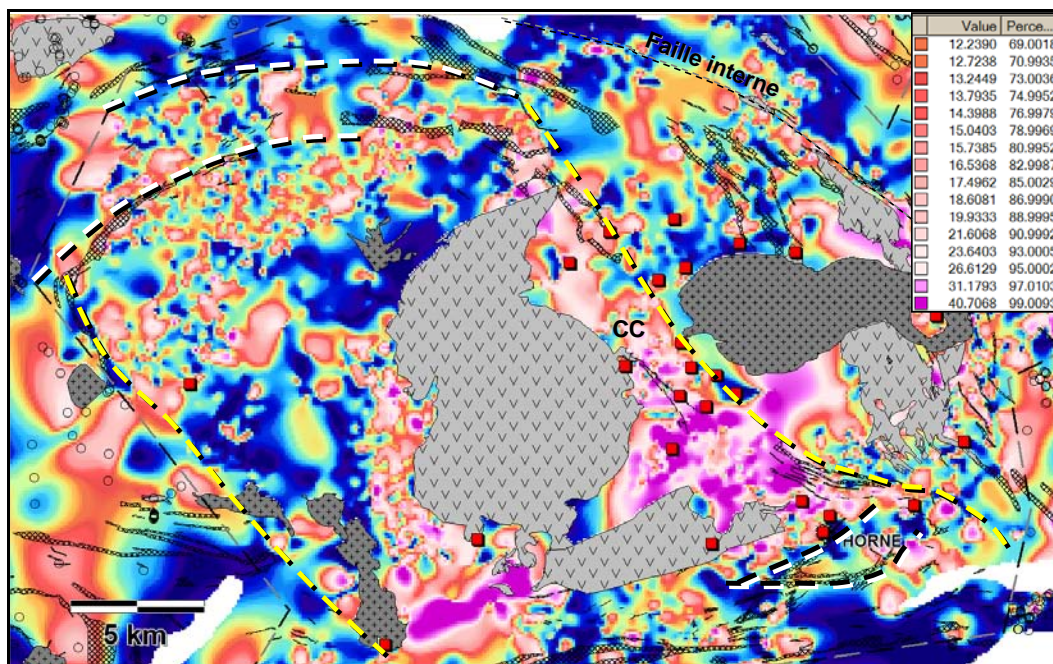


Figure 27 : Maille de l'indice d'altération IPARA (avec légende) et dykes corrélés au réseau annulaire de Misema (traits blancs), au réseau NO-SE de New Senator (traits jaunes) et au bloc Horne (traits noirs). La ligne avec les traits gris et noirs correspond à la limite de la région de plus forte densité d'échantillons géochimiques. Camp Central (CC). [Retour au texte](#)

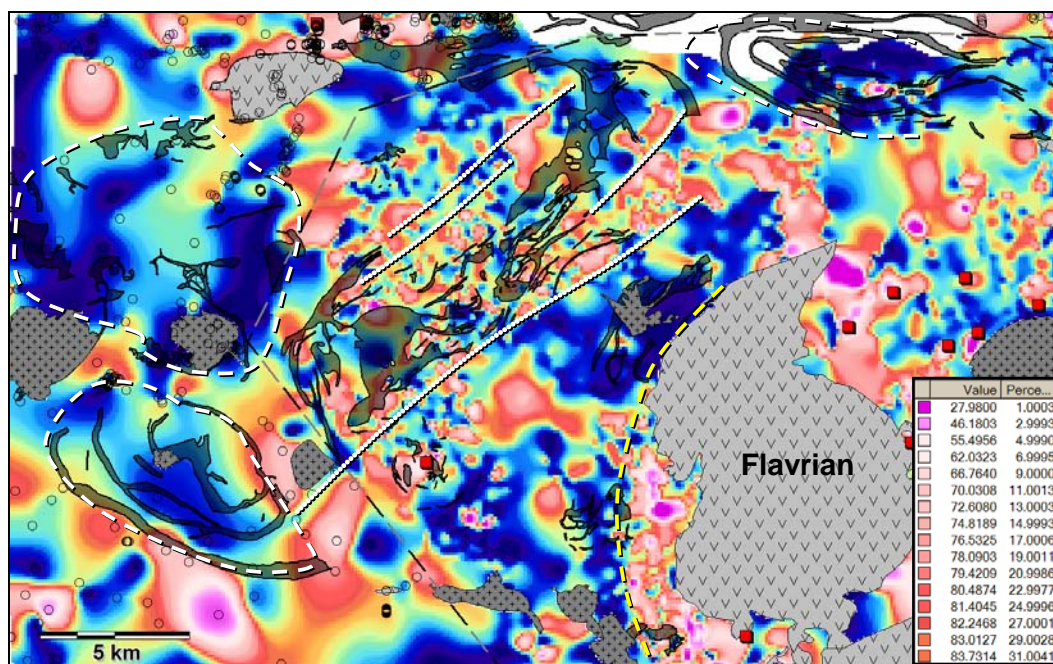


Figure 28 : Maille de l'indice d'altération IFRAIS. Les valeurs les plus faibles (couleur mauve) de la légende représentent les plus fortes altérations en alcalis. Centres volcaniques peu altérés (tirets blancs), structures linéaires et parallèles délimitant une zone plus altérée (pointillé blanc) et limite d'une forte altération sur le flanc ouest du Pluton de Flavrian (tirets jaunes). [Retour au texte](#)

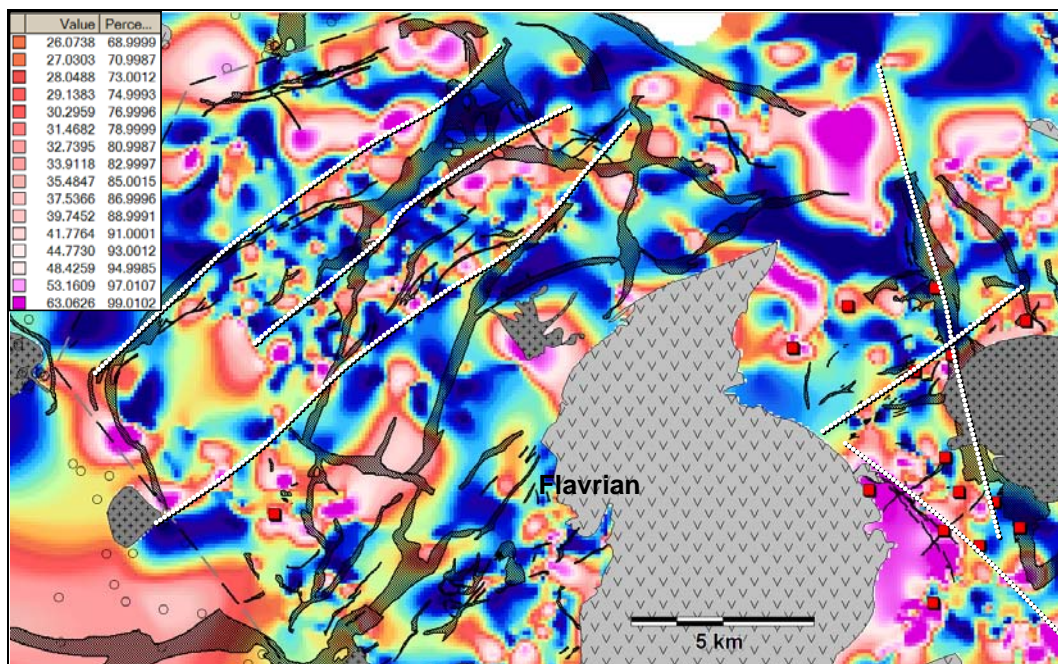


Figure 29 : Maille de l'indice séricite ($K_2O/(K_2O + Na_2O)$ normalisé sur 100 avec légende en relation spatiale avec le complexe de dykes du Horseshoe (à l'ouest du Pluton de Flavrian), le Dyke Dufresnoy (Du) et les dykes des failles Despina-McDougall (FDM). [Retour au texte](#)

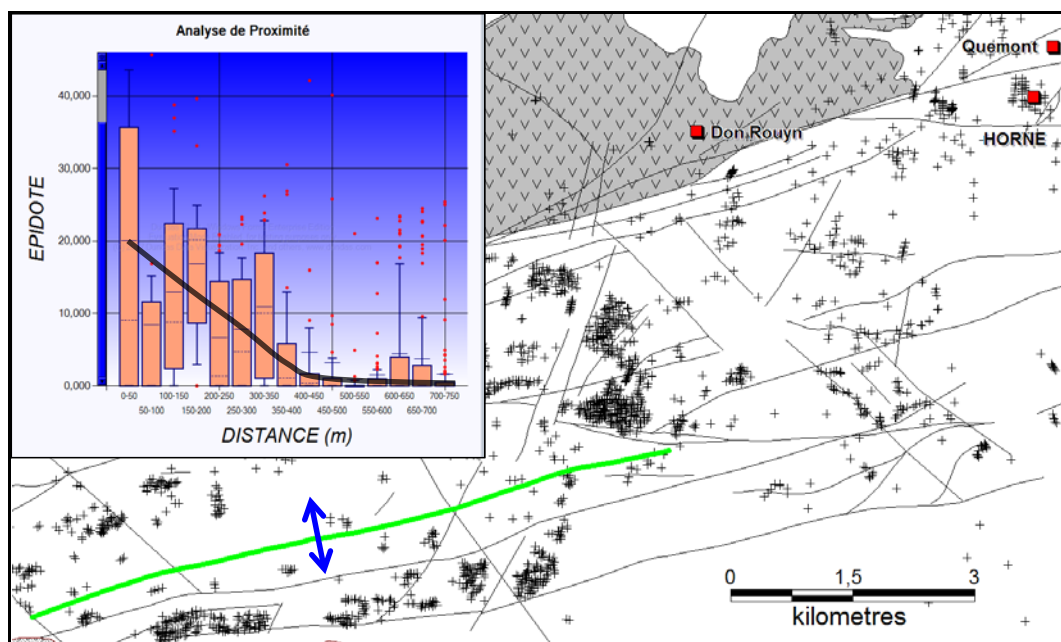


Figure 30 : Exemple d'une analyse spatiale radiale de l'altération en bordure d'une faille (ligne verte) au Sud de Rouyn-Noranda avec la position des échantillons géochimiques (croix noires). Le graphique en boîtes à moustache produit par le logiciel montre clairement la décroissance de l'Épidote normative (NORMAT) par intervalles de distance de 50 m perpendiculairement à la trace de la faille (double flèche bleue). [Retour au texte](#)

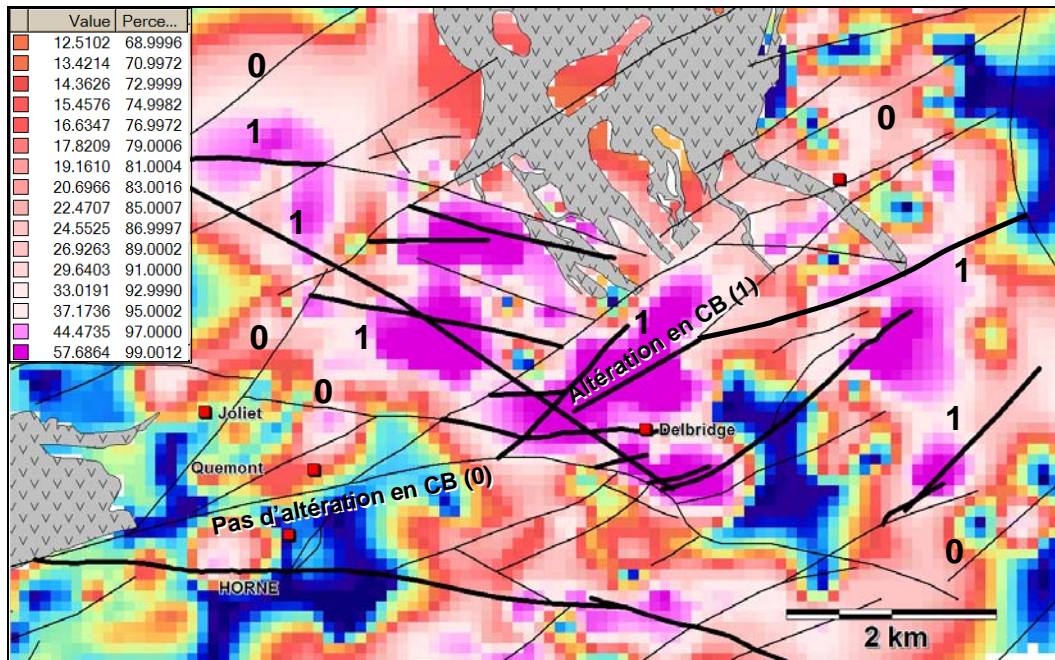


Figure 31 : Exemples de failles avec lien spatial positif (1) ou négatif (0) à l'indice de saturation en carbonates ($\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) près des mines SMV de Rouyn-Noranda. [Retour au texte](#)

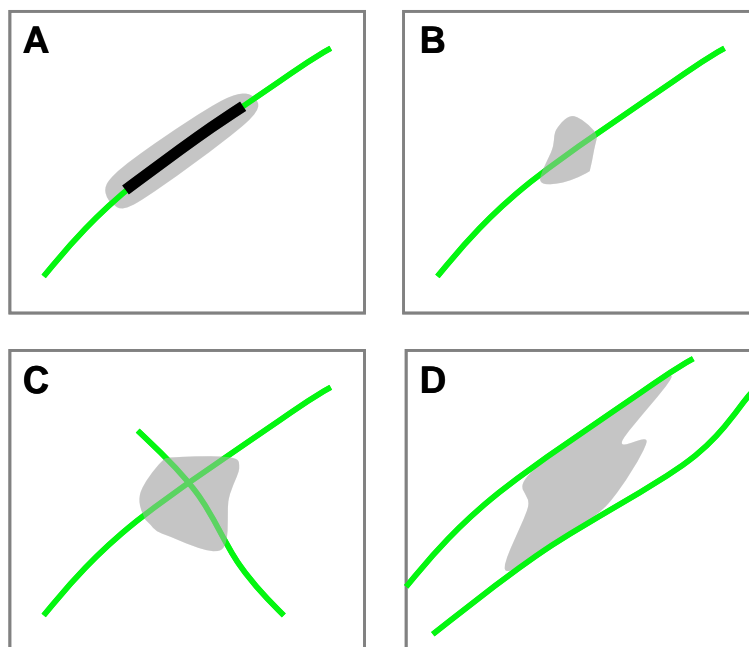


Figure 32 : Les quatre cas considérés de manière schématique montrant une relation spatiale positive (valeur de 1 attribuée dans la banque de données) entre une faille (ligne verte) et une zone d'altération (le gris indique la valeur supérieure au 97^e centile). A) Attribution à un segment de faille. B) Attribution à toute la faille pour une altération localisée. C) Attribution aux 2 failles s'entrecroisant. D) Attribution aux 2 failles bordant une altération ; dans ce cas, l'altération peut être contemporaine ou postérieure aux failles. [Retour au texte](#)

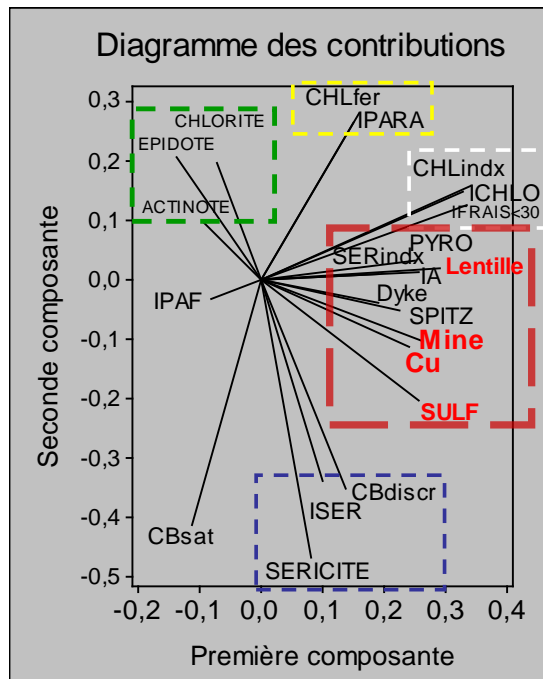


Figure 33 : Diagramme de contributions des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales (ACP) expliquant le maximum de variation dans la base de données des failles connues et ayant au moins deux types d'altération. Noter les regroupements d'altérations et l'assemblage fertile pour les failles minéralisées (contour rouge). [Retour au texte](#)

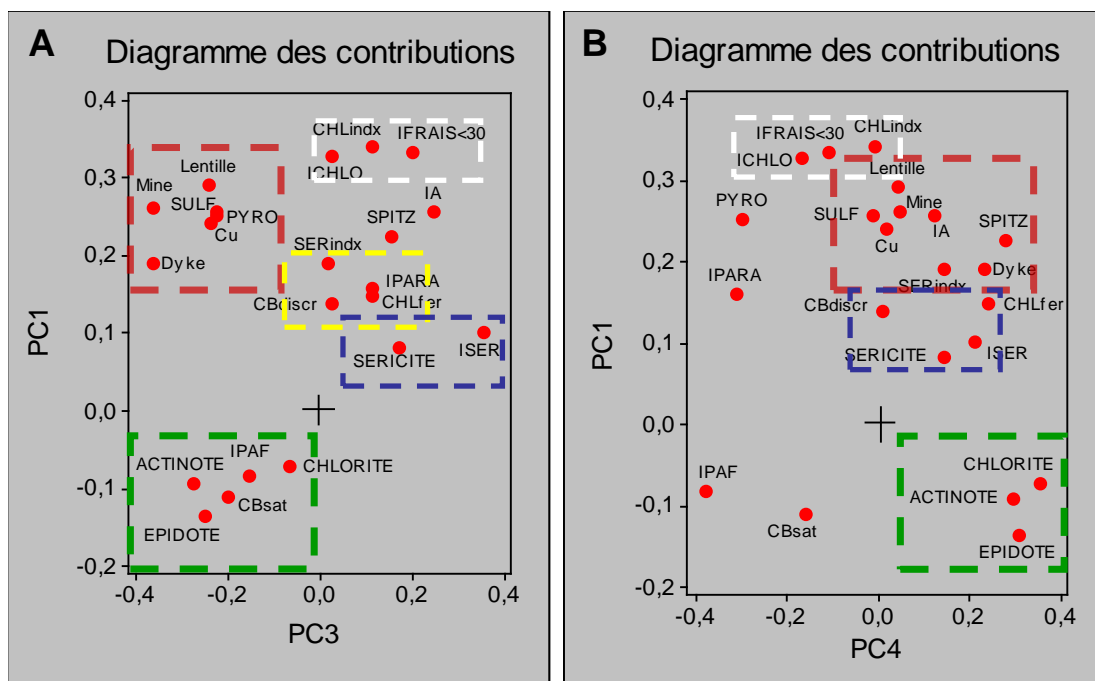


Figure 34 : A) Diagrammes de contributions de la première composante principale de l'ACP (PC1) versus la troisième (PC3), et B) de PC1 versus la quatrième composante (PC4) et les principaux assemblages d'altération pour les failles connues et ayant au moins deux types d'altération. [Retour au texte](#)

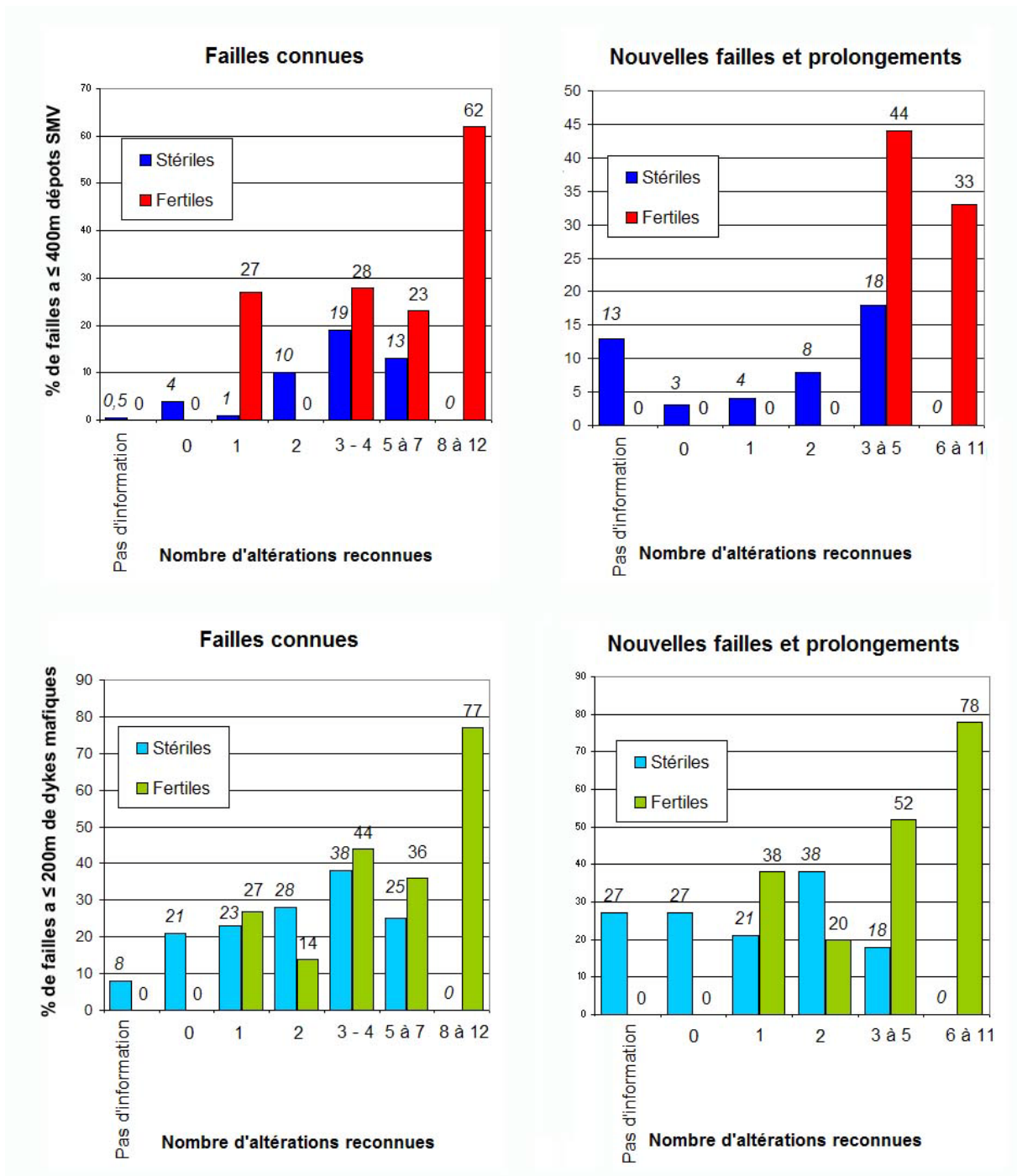


Figure 35 : Graphiques montrant les pourcentages de failles situées à ≤400m de gisements de SMV et à ≤200m de dykes mafiques à intermédiaires en fonction du nombre d'altérations reconnues en bordure des failles connues et des nouvelles failles (et prolongements de failles) stériles ou fertiles. [Retour au texte](#) ; [section 4.7.2](#) ; [section 4.8](#)

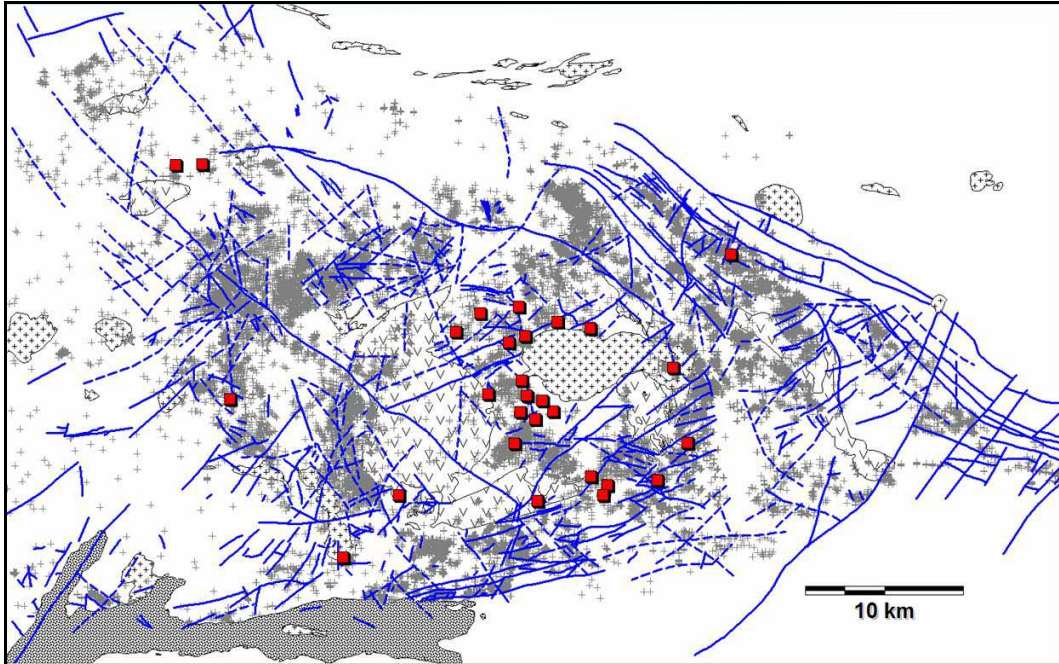


Figure 36 : Distribution des 662 failles considérées stériles sur une base géochimique ou n'ayant aucune information lithogéochimique. Failles connues (traits continus bleus) et failles interprétées (traits hachurés bleus). Les croix grises indiquent la présence d'un échantillon lithogéochimique et l'unité grise au SO de la figure est le Groupe de Cobalt (roches sédimentaires protérozoïques). Mines SMV (carrés rouges).

[Retour au texte](#)

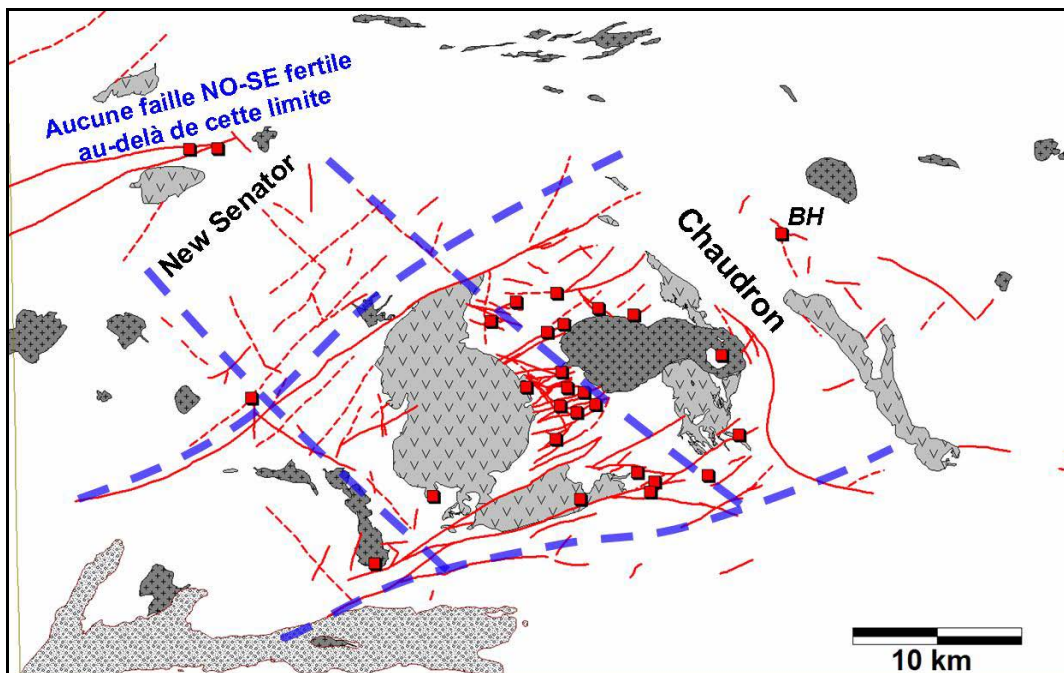


Figure 37 : Distribution des 168 failles considérées fertiles et qui montrent des relations spatiales positives avec les indicateurs d'altération Ishikawa, pyrophyllite ou Spitz-Darling. Failles connues (traits continus rouges, n=120), failles interprétées (tirets rouges, n=48), limites des caldeiras (tirets bleus), Mine Bouchard-Hébert (BH), et mines SMV (carrés rouges).

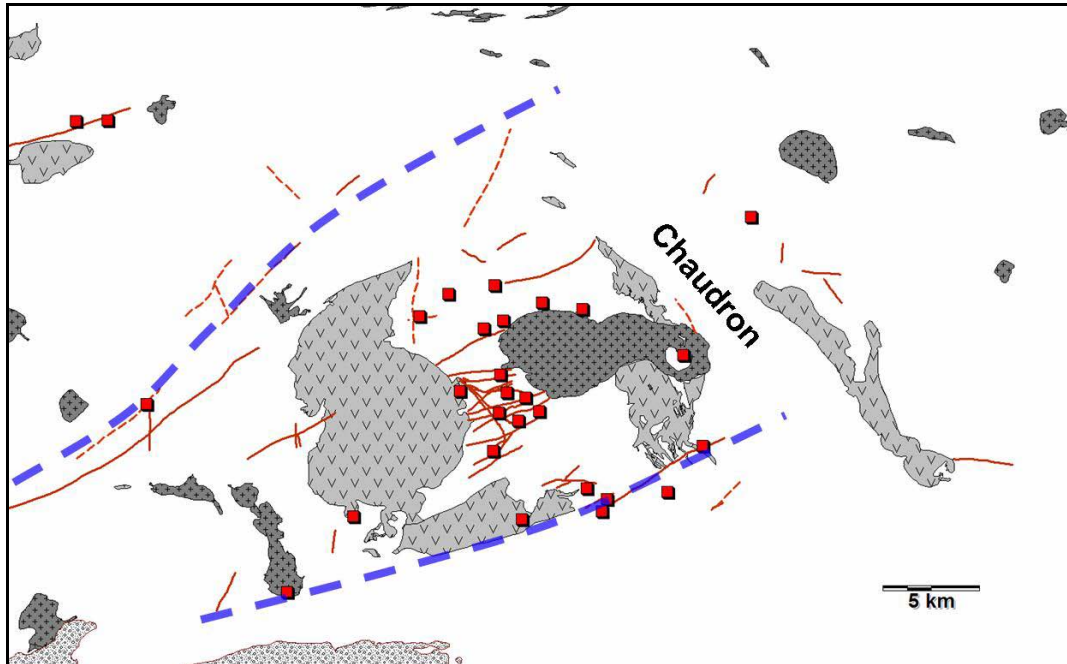


Figure 38 : Distribution des 52 failles considérées les plus fertiles et répondant au critère suivant : Ishikawa + pyrophyllite ou Ishikawa + Spitz-Darling ou Spitz-Darling + pyrophyllite. Failles connues (traits continus rouges), failles interprétées (tirets rouges), limite de la Caldeira de Noranda (tirets bleus) et mines SMV (carrés rouges). [Retour au texte](#)

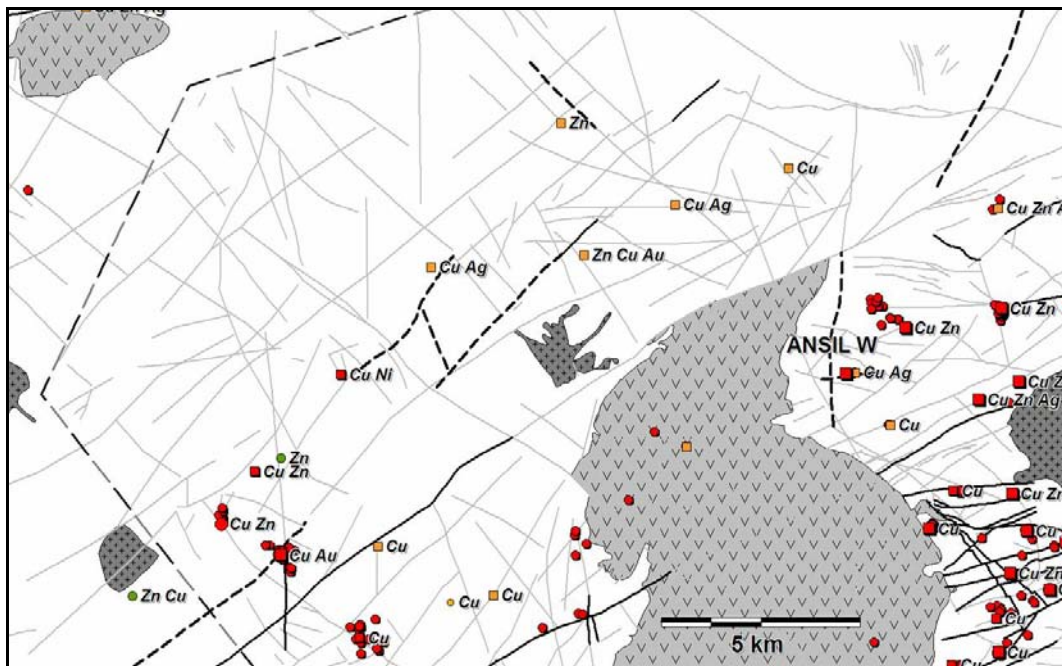


Figure 39 : Détails des failles les plus fertiles (lignes noires : failles connues, traits noirs : failles interprétées) en relation spatiale avec les mines de SMV (carrés rouges ombragés), les indices de métaux de base (carrés rouges et oranges) et de cuivre (cercles rouges) et autres failles considérées stériles ou moins fertiles (lignes grises). La région de forte densité d'échantillons lithogéochimiques est délimitée par les tirets noir et gris. [Retour au texte](#)