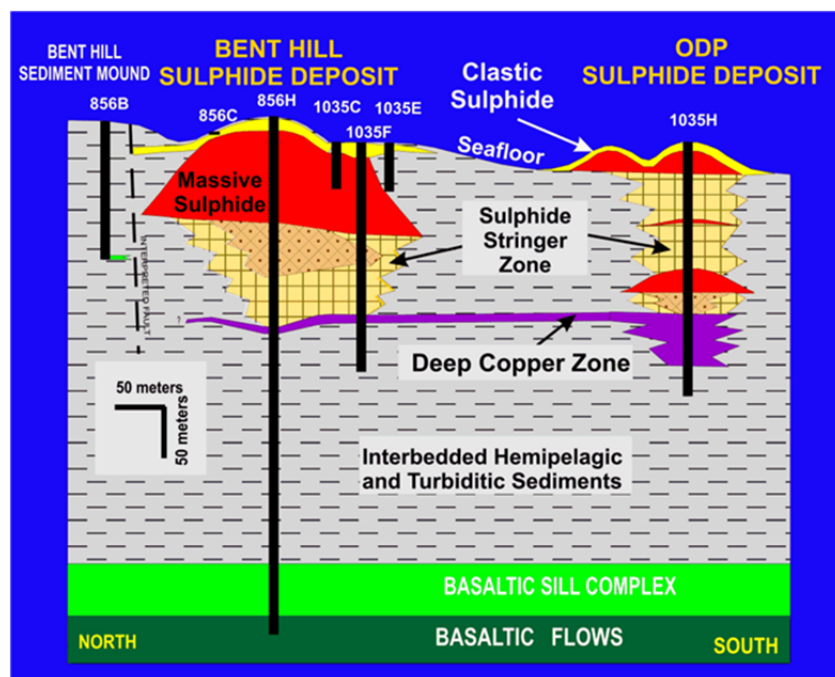


# REEVALUATION CONCEPTUELLE DES MODELES D'EXPLORATION POUR LES SMV EN ABITIBI

Partie B : Utilisation du signal MEGATEM pour l'exploration des SMV de type  
pélagique-mafique

PROJET 2010-04



Gisement Bent Hill, Ride Juan de Fuca;  
<http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/photolib/vms/midval/images/fig08.gif>

PAR : BENOIT LAFRANCE  
COLLABORATION SPECIALE DE MICHEL ALLARD, XSTRATA ZINC

JUIN 2011

---

## AVERTISSEMENT

---

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minière) 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 :

*Lafrance, B. et Allard, M. (collaboration spéciale), 2011. Réévaluation conceptuelle des modèles d'exploration pour les SMV en Abitibi. Partie B : Utilisation du signal MEGATEM pour l'exploration des SMV de type pélitique-mafique. Rapport, Projet CONSOREM 2010-04, 33 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](mailto:consorem@uqac.ca)  
Site Web: [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

Ce projet visait à développer de nouvelles stratégies pour l'exploration des gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) en Abitibi. Traditionnellement, l'exploration des SMV en Abitibi a toujours reposé sur le modèle des gisements de type bimodal mafique qui sont associés aux rhyolites, aux altérations à chlorite-séricite et aux conducteurs géophysiques isolés. Cependant, plus de 90 % des roches volcaniques en Abitibi sont mafiques et l'Abitibi est également caractérisée par de nombreux bassins de roches sédimentaires ce qui laissait une très grande superficie très peu explorée. Le projet visait donc à établir le potentiel de trouver des gisements de SMV dans les contextes de roches mafiques (SMV de type mafique) et de roches mafiques-sédimentaires (SMV de type pélitique-mafique). Il sera ici question des SMV de type pélitique-mafique puisque les résultats pour les SMV de type mafique sont présentés dans un autre rapport.

Les gisements de type pélitique-mafique sont associés aux bassins de suprasubduction qui contiennent une grande quantité de roches sédimentaires de faciès profonds (argilite, siltstone) recoupées par des filons-couches mafiques-ultramafiques. Le problème pour l'exploration dans ce contexte est que l'altération des roches sédimentaires est encore mal comprise et que la plupart des bassins sédimentaires de l'Abitibi sont caractérisés par des conducteurs géophysiques linéaires régionaux constitués de centaines d'anomalies électromagnétiques. Il est donc difficile de sélectionner des cibles directes parmi ce grand nombre d'anomalies.

Afin de contourner cette problématique, l'approche envisagée visait à étudier les variations de la signature des conducteurs linéaires régionaux MEGATEM en Abitibi dans le but de discriminer les anomalies causées par des sulfures par rapport aux anomalies de graphite. L'approche novatrice de cette étude consiste à étudier les conducteurs de façon longitudinale plutôt que le long des lignes de vol (perpendiculaire), ceci dans le but de comparer les anomalies entre elles plutôt que par rapport au bruit de fond.

Une approche par analyse en composantes principales a permis de tester les corrélations possibles entre les caractéristiques géologiques et géophysiques des conducteurs (mag, dérivé du champ magnétique secondaire dans le temps (dB/dt), champ magnétique secondaire (champ-B), constante  $\tau$ , Tee, conductance). Pour ce faire, la relecture des journaux de forages a été faite pour décrire les épaisseurs, les pourcentages et la nature (graphite, pyrite, pyrrhotine, chalcopyrite, sphalérite, magnétite) des corps conducteurs. L'analyse en composante principale provenant de 6 conducteurs linéaires (253 anomalies et 44 forages) a permis d'établir un lien entre un pourcentage élevé de pyrrhotine et un signal fort pour le champ-Bx de la fenêtre 1 et un signal faible pour le champ-Bx de la fenêtre 4 (par rapport à pyrite, graphite et magnétite). Le contrôle possible du type de dépôts de surfaces (till, argile, roc, etc.) sur cette observation reste cependant à être testé.

La constante  $\tau$  Bx des fenêtres précoces 10-12, qui a été calculée spécifiquement dans le cadre de ce projet, permet aussi de discriminer les anomalies à dominante de pyrite-pyrrhotine qui possèdent un  $\tau$  Bx (10-12) élevé, par rapport à celles à graphite et magnétite dont le  $\tau$  Bx (10-12) est bas.

Ces résultats suggèrent qu'il faudrait peut-être modifier l'approche classique de l'analyse des signaux qui consiste généralement à regarder seulement les fenêtres 10 à 20. En ce sens, l'étude des fenêtres 1 à 4 (fenêtres « on-time »), qui ne sont généralement jamais regardées parce qu'elles sont synchrones au pulse primaire induit et qu'il y a beaucoup de bruit de fond, de même que du  $\tau$  Bx des fenêtres précoces (10-12) qui n'est jamais calculé, pourrait constituer une percée significative dans le but de discriminer la nature des conducteurs électromagnétiques. Ces conclusions sont des pistes de recherche qui restent cependant à être testées et validées par l'étude de plusieurs autres cas.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

Avertissement .....	i
Résumé .....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des figures.....	iv
1 Introduction .....	1
2 Caractéristiques des smv de type pélitique-mafique.....	3
2.1 Environnement géodynamique .....	3
2.2 Contexte géologique .....	4
2.3 Signature géophysique .....	4
2.4 Résumé des caractéristiques clés pour l'exploration .....	8
3 Méthodologie .....	8
3.1 Le système MEGATEM®II .....	8
3.2 Approche novatrice d'analyse des levés.....	10
3.3 Construction de la base de données d'anomalies MEGATEM linéaires .....	11
4 Corrélations entre les paramètres géophysiques et géologiques.....	14
4.1 Analyse en composantes principales des paramètres géophysiques .....	14
4.2 Analyse en composantes principales des paramètres géologiques et géophysiques.....	20
4.3 Autres relations entre paramètres géophysiques et géologiques .....	24
4.4 Résumé de l'analyse en composante principale .....	27
5 Test d'application des résultats .....	27
6 Conclusion .....	31
7 Références.....	32

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Roches sédimentaires et volcaniques mafiques-intermédiaires de l'Abitibi. Les principales unités de roches sédimentaires sont identifiées. Modifié de SIGEOM (2009) et OGS (2005).....	2
Figure 2.	Carte des anomalies MEGATEM du secteur de la mine Casa Berardi. Plusieurs des contacts roches sédimentaires (en bleu pâle) / volcanites (vert) et des contacts intra sédiments et intra volcanites sont caractérisés ou révélés par les anomalies qui forment de grands conducteurs linéaires régionaux. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	2
Figure 3.	Exemple d'environnement de champs hydrothermaux actifs associés à un contexte pélitique-mafique; Ride Juan de Fuca, Guaymas Basin, East Pacific Rise Nord. Modifié de Ryan et al. (2009) et Beaulieu (2010).....	3
Figure 4.	Exemple du SMV de Bent Hill de type pélitique-mafique qui est localisé dans le rift de Middle Valley de la Ride Juan de Fuca. Ce rift qui est proximal à la côte Ouest américaine est caractérisé par une sédimentation importante et la présence de filons-couches mafiques et d'une chambre magmatique axiale. Modifié de Goodfellow et Zierenberg (1999).....	4
Figure 5.	Stratigraphie schématique associée au gisement de Fyre Lake, Yukon. La lentille de sulfures est associée aux volcanites mafiques et ultramafiques qui sont présentes au sein des roches sédimentaires. Modifié de Peter et al. (2007). ....	5
Figure 6.	Modèle schématique de formation des gisements Lynx et Wolverine du district de Finlayson au Yukon. A) Dépôts hydrothermaux de basse température (200-300 °C) formant des lentilles de sulfures massifs à pyrite-sphalérite-galène-tétrahédrite et des zones de remplacement et stockwerk de pyrite-sphalérite sous les lentilles. La formation de sulfures est contemporaine à l'argilite graphiteuse formant ainsi un horizon conducteur de sulfures et graphites. B) Hydrothermalisme de haute température avec précipitation de chalcopryrite (265-353 °C) à la base de la lentille et en stockwerk sous la lentille. C) Recouvrement par d'autres horizons d'exhalites, de volcanites et d'argilites graphiteuses et précipitation de formation de fer à magnétite. D) Déformation et métamorphisme. Modifié de Bradshaw et al. (2003). ....	6
Figure 7.	Carte de la géologie et des conducteurs électromagnétiques du secteur de la mine Casa Berardi. La présence de roches sédimentaires (bleu et gris) et de volcanites mafiques (vert) dans l'empilement stratigraphique rendent le secteur intéressant pour les minéralisations de SMV de type pélitiques-mafiques. Les anomalies Input sont identifiées par les cercles noirs alors que les anomalies MEGATEM sont identifiées par les cercles rouges. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	7
Figure 8.	Carte de la conductivité et de la valeur de la constante $\tau$ Bx dans le secteur de la mine Casa Berardi. Les valeurs du $\tau$ Bx varient le long des conducteurs linéaires régionaux (points de couleurs). La région est également caractérisée par des variations de conductivité qui sont représentées par l'image «maillée» en arrière-plan. Modifié du DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008 ; carte à la même échelle que la figure 7).....	7
Figure 9.	Géométrie du système MEGATEM®II de Fugro Airborne Surveys. Tirée du DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	9

Figure 10.	Exemple du signal du champ magnétique secondaire (Bx) selon l'axe X associé à un point de mesure lors d'un levé MEGATEM. Le profil provient du logiciel Oasis Montaj de Geosoft. Dans cet exemple, il s'agit du point de lecture 452 sur 866 le long de la ligne de vol L42001. Les carrés noirs représentent le signal pour chacune des vingt fenêtres. Voir le texte pour les explications.....	10
Figure 11.	Portion du levé MEGATEM dans le secteur de la mine Casa Berardi. Chaque point de lecture le long des lignes de vol orientées nord-sud est représenté par un carré noir. Les anomalies identifiées le long de ces lignes de vol (points rouges) définissent deux conducteurs linéaires est-ouest. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	11
Figure 12.	Forages et anomalies MEGATEM du secteur de la mine Casa Berardi. Les collets de forage et leurs traces sont en bleu, les anomalies sont représentées par les symboles rouges. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	12
Figure 13.	Localisation des longitudinales des secteurs Normétal Est et d'Amos. Géologie modifiée du SIGEOM (2009). .....	13
Figure 14.	Corrélation spatiale entre les forages et les anomalies MEGATEM. Les collets de forage et leurs traces sont en bleu, les anomalies sont représentées par les symboles rouges. Tous les journaux de sondage ainsi que les sections de forages ont été consultés afin de rattacher le bon conducteur avec l'anomalie MEGATEM la plus proche. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).....	13
Figure 15.	Compilation des paramètres géophysique et géologique dans une base de données unique. Seules deux portions de la base de données sont présentées, mais la base de données contient en fait 58 variables (colonnes) impossibles à représenter ici. Les variables géophysiques proviennent des levés MEGATEM de Fugro. La compilation des pourcentages et épaisseurs des minéraux conducteurs a permis de classer chaque intersection en 10 différents types selon les proportions des minéraux (colonne soulignée en jaune). .....	14
Figure 16.	Choix des 11 paramètres géophysiques choisis pour effectuer l'analyse en composante principale. Trois des paramètres sont des nouveaux calculs effectués dans le cadre de cette étude à partir des données brutes. ....	15
Figure 17.	Projection des composantes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des variables géophysiques. ....	16
Figure 18.	Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des différents types de conducteurs. Les 10 types de conducteurs décrits en forages sont regroupés selon 4 divisions qui reposent sur le minéral dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotine; Cp=chalcopryrite; Mt=magnétite).....	17
Figure 19.	Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des groupes minéraux dominants. La valeur de la composante 2 permet de discriminer les conducteurs à Po dominante par rapport aux conducteurs à Gp-Py et à Mt dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotine; Cp=chalcopryrite; Mt=magnétite). .....	18
Figure 20.	Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts meubles par rapport aux valeurs de la composante 2. ....	19
Figure 21.	Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des types de dépôts de surface. ....	19

- Figure 22. Valeurs du champ Bx1 et types de dépôts de surface associés à la longitudinale du secteur d'Amos. A) Grille des valeurs du champ magnétique secondaire Bx1. B) Carte des dépôts de surface (modifié de Veillette et al., 2003). Les valeurs élevées de Bx1 sont corrélables avec la présence de roc. Par contre, il existe des variations du champ Bx1 qui ne s'expliquent pas seulement par le type de dépôt. Il existe par exemple des variations significatives à l'intérieur de la plaine argileuse..... 20
- Figure 23. Choix des 20 paramètres géophysiques et géologiques choisis pour effectuer l'analyse en composante principale. Trois des paramètres sont des nouveaux calculs effectués dans le cadre de cette étude à partir des données brutes. .... 21
- Figure 24. Projection des composantes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales pour les paramètres géologiques et géophysiques. Voir la liste des paramètres à la figure 23..... 22
- Figure 25. Diagramme de boîte à moustaches des champs Bx1 et Bx4 en fonction des différents types de conducteurs. Les 10 types de conducteurs décrits en forages sont regroupés selon 4 divisions qui reposent sur le minéral dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotine; Cp=chalcopryrite; Mt=magnétite). .... 23
- Figure 26. Profils théoriques du champ Bx des fenêtres 1 à 5 pour les différents types de conducteurs. Ces profils ont été construits à partir des résultats de l'analyse en composantes principales qui suggèrent que les conducteurs à pyrrhotine possèdent la différence  $|Bx4-Bx1|$  la moins grande. Il faut faire le calcul en valeurs absolues puisque Bx1 est négatif et que Bx4 est positif. .... 24
- Figure 27. Diagramme de boîte à moustaches de la valeur de la constante  $\tau$  Bx précoce (10-12) en fonction des différents types de conducteurs. Les conducteurs à sulfures (Py-Po) possèdent une valeur  $\tau$  Bx (10-12) significativement plus élevée que pour les conducteurs à graphite ou à magnétite. La constante  $\tau$  Bx (10-12) a été calculée spécialement dans le cadre de cette étude et n'est généralement pas regardée lors des levés. .... 25
- Figure 28. Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts de surface par rapport aux valeurs de la constante  $\tau$  Bx pour les fenêtres précoces (10-12)..... 25
- Figure 29. Diagramme de boîte à moustaches de la valeur de la conductance en fonction des différents types de conducteurs..... 26
- Figure 30. Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts de surface par rapport à la conductance. Il existe une corrélation très claire entre les deux variables. .... 27
- Figure 31. Localisation de la longitudinale Amos 2. La longitudinale représente un des conducteurs linéaires régionaux est-ouest qui sont définis par un alignement d'anomalies identifiées le long des lignes de vol nord-sud. La ligne de vol 22001 représente un exemple des lignes de vol nord-sud espacées aux 200 m qui ont été réalisées lors du levé MEGATEM..... 28
- Figure 32. Variables géophysiques associées à la ligne de vol nord-sud 22001. A) Mesures du champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 12. La sélection des anomalies se fait à partir de la position des pics par rapport au bruit de fond. B) Valeur de la constante  $\tau$  Bx calculée pour l'ensemble des fenêtres (10-20). C) Variations importantes du champ magnétique secondaire Bx1. Les deux conducteurs dominés par la pyrrhotine (Po-Mt) et la pyrite (Py-Po) possèdent une valeur élevée alors que le conducteur dominé par le graphite (Gp-Po) a une valeur plus basse. Les lignes verticales sont des repères pour pouvoir comparer la même station de prise de mesure d'un graphique à l'autre. .... 29
- Figure 33. Variables géophysiques associées à la longitudinale Amos 2. Les points bleus sont les anomalies sélectionnées à partir des lignes nord-sud vues le long de la

longitudinale. Les cercles rouges sont les anomalies que l'on peut associer avec une description géologique en forage. Les cercles vert et bleu servent à comparer deux anomalies qui possèdent la même valeur de champ-Bx12. Voir le texte pour les explications. A) Mesures du champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 12. B) Variations du champ magnétique secondaire Bx1. C) Différence en valeur absolue des champs secondaires « on-time » Bx4 et Bx1. D) Valeur de la constante *tau* précoce pour les fenêtres 10-12. Cette valeur a été calculée spécifiquement pour cette étude puisque généralement c'est le *tau* Bx total (10-20) qui est présenté suite aux levés. .... 30



---

## 1 INTRODUCTION

---

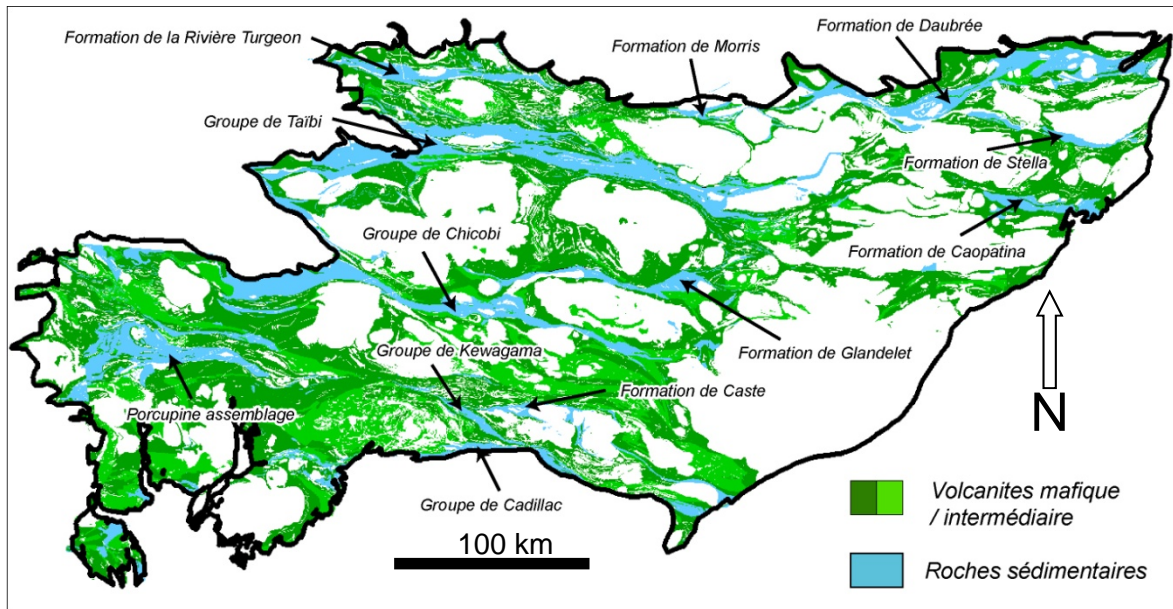
Très rapidement, suite aux premières découvertes de gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) en Abitibi (Normétal, 1923; Horne, 1925; Amulet, 1925; Aldermac, 1925) la stratégie d'exploration pour ce type de minéralisations a été associée à la présence de rhyolites. Cette approche a toujours été favorisée par la suite avec un bon taux de succès (Noranda, Matagami, Joutel, Val-d'Or) et en fait, la presque totalité des gisements de SMV en Abitibi, hormis la mine Potter en Ontario, sont maintenant classifiés comme étant de type bimodal mafique (Galley et al., 2007), c'est-à-dire que les dépôts sont directement associés avec les rhyolites sommitales de séquences volcaniques dominées par les roches mafiques. Les efforts en exploration ont donc traditionnellement suivi ce modèle bimodal mafique (ex. : Gibson et al., 2007) qui repose sur la présence de rhyolite, d'altération à chlorite-séricite et d'anomalies géophysiques isolées. Cette approche fait en sorte qu'il y a seulement une petite portion des roches volcaniques de l'Abitibi qui ont fait l'objet de travaux d'exploration soutenus.

L'Abitibi est caractérisée par un important volume de roches volcaniques mafiques et par d'importantes bandes de roches sédimentaires (p. ex. Groupes de Cadillac, Kewagama, Caste, Chicobi, Taibi; **Figure 1**). Or, des minéralisations de types sulfures massifs volcanogènes associées à de tels contextes où dominant les roches sédimentaires clastiques et les volcanites mafiques sont bien connues ailleurs dans le monde (p. ex. Otokumpu, Finlande; Windy Craggy, Colombie-Britannique; Besshi, Japon). Ces gisements, connus antérieurement dans la littérature comme étant les SMV de type Besshi, sont maintenant décrits comme les SMV de type pélitique-mafiques selon la classification de Franklin et al. (2005).

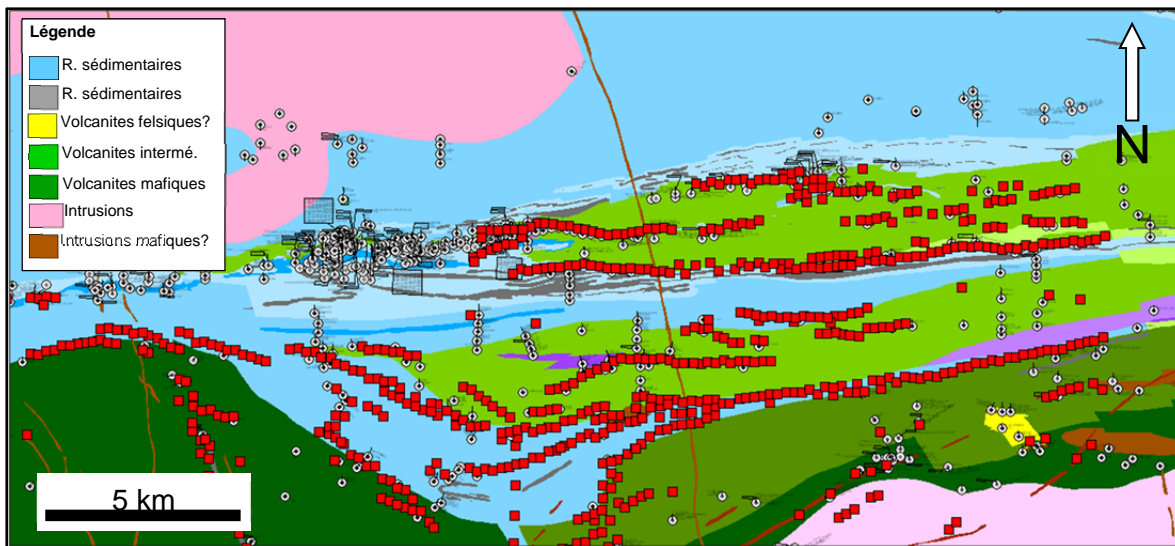
Il existe donc un large territoire qui a été très peu exploré pour les SMV de type pélitique-mafique. Cependant, l'exploration de ce type de gisement est difficile parce que la majorité des contacts volcanites/roches sédimentaires de même que plusieurs contacts intra volcanites sont marqués par de très importants conducteurs géophysiques régionaux à graphite et sulfures (**Figure 2**). L'existence de ces longs conducteurs continus a pour effet de rendre difficile l'identification de cibles de forages puisqu'il y a une réponse géophysique partout plutôt qu'une réponse de conducteurs isolés. De plus, l'altération hydrothermale n'est pas très importante dans ces systèmes et est difficile à reconnaître dans les roches sédimentaires rendant son utilisation plus limitée comme outils de ciblage. L'approche envisagée pour contourner cette problématique est de tenter de caractériser le signal géophysique associé aux sulfures plutôt qu'au graphite le long des grands conducteurs régionaux. Les nombreux nouveaux levés MEGATEM effectués en Abitibi au cours des dernières années et rendus publics en 2008 (MRNF, DP 2008-41) seront donc mis à profit selon cette approche.

Ce rapport passe tout d'abord en revue les caractéristiques du modèle gîtologique pour les sulfures massifs volcanogènes de type pélitique-mafique en termes d'environnement tectonique, de contexte géologique, d'altération et de signature géophysique dans le but d'identifier les caractéristiques clés qui serviront à identifier les secteurs favorables.

Le projet a été réalisé en collaboration avec le géophysicien Michel Allard de Xstrata Zinc puisqu'il s'agissait spécifiquement d'étudier les signaux associés aux levés MEGATEM en Abitibi.



**Figure 1.** Roches sédimentaires et volcaniques mafiques-intermédiaires de l'Abitibi. Les principales unités de roches sédimentaires sont identifiées. Modifié de SIGEOM (2009) et OGS (2005).



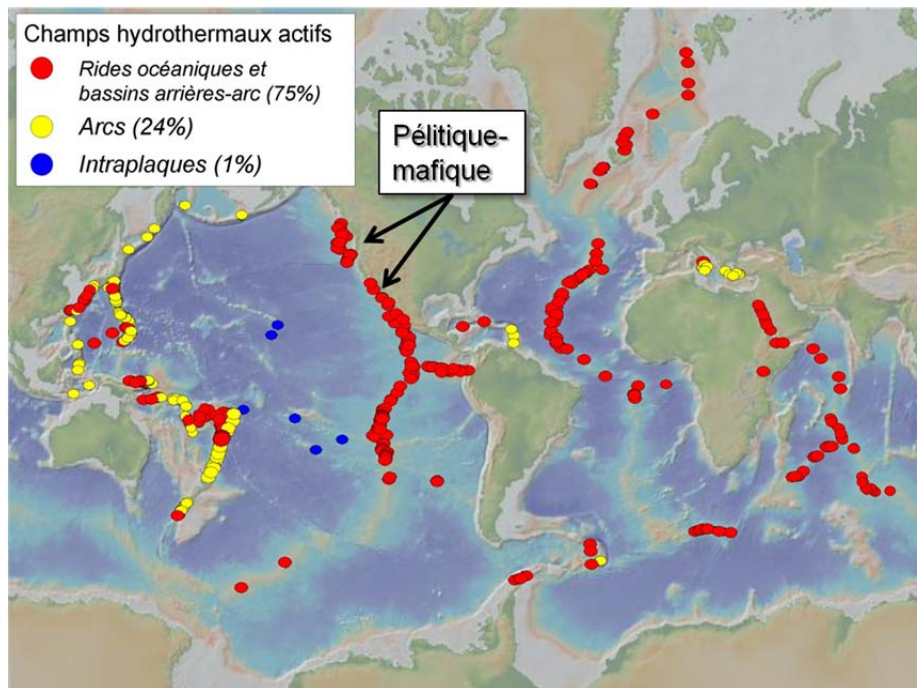
**Figure 2.** Carte des anomalies MEGATEM du secteur de la mine Casa Berardi. Plusieurs des contacts roches sédimentaires (en bleu pâle) / volcanites (vert) et des contacts intra sédiments et intra volcanites sont caractérisés ou révélés par les anomalies qui forment de grands conducteurs linéaires régionaux. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).

## 2 CARACTÉRISTIQUES DES SMV DE TYPE PÉLITIQUE-MAFIQUE

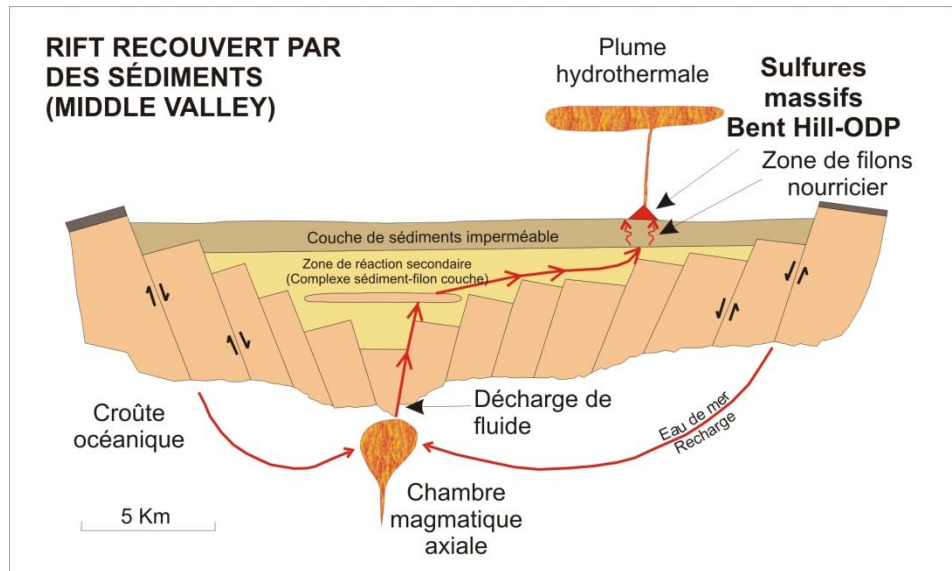
Cette section passe en revue les caractéristiques associées aux sulfures massifs volcanogènes de type pélitique-mafique dans le but d'identifier les critères importants qui serviront à proposer une stratégie d'exploration applicable au contexte de l'Abitibi.

### 2.1 Environnement géodynamique

Les sulfures massifs de ce type sont associés à des contextes tectoniques de rifts océaniques proximaux aux continents ou de bassins de suprasubduction matures (bassins d'avant, intra et arrière-arc; Galley et al., 2007; Franklin et al., 2005), la constante étant qu'il doit y avoir un relief significatif qui favorise une sédimentation abondante (**Figure 3**). À cet environnement extensif avec sédiments correspond, tout comme pour les SMV de type mafique, du magmatisme de type N-MORB, tholéiite d'arc ou de type komatiitique dans le cas des séquences archéennes (**Figure 4**).



**Figure 3.** Exemple d'environnement de champs hydrothermaux actifs associés à un contexte pélitique-mafique; Ride Juan de Fuca, Guaymas Basin, East Pacific Rise Nord. Modifié de Ryan et al. (2009) et Beaulieu (2010).



**Figure 4.** Exemple du SMV de Bent Hill de type pélitique-mafique qui est localisé dans le rift de Middle Valley de la Ride Juan de Fuca. Ce rift qui est proximal à la côte Ouest américaine est caractérisé par une sédimentation importante et la présence de filons-couches mafiques et d'une chambre magmatique axiale. Modifié de Goodfellow et Zierenberg (1999).

Il est possible d'observer pour plusieurs secteurs de l'Abitibi une interdigitation de roches sédimentaires et de volcanites, comme par exemple dans le secteur de la mine Casa Berardi (**Figure 2**), ce qui peut être considéré comme favorable à la présence de SMV de type pélitique-mafique. Il est cependant parfois difficile d'établir si les contacts entre les roches sédimentaires et les volcanites sont stratigraphiques ou tectoniques.

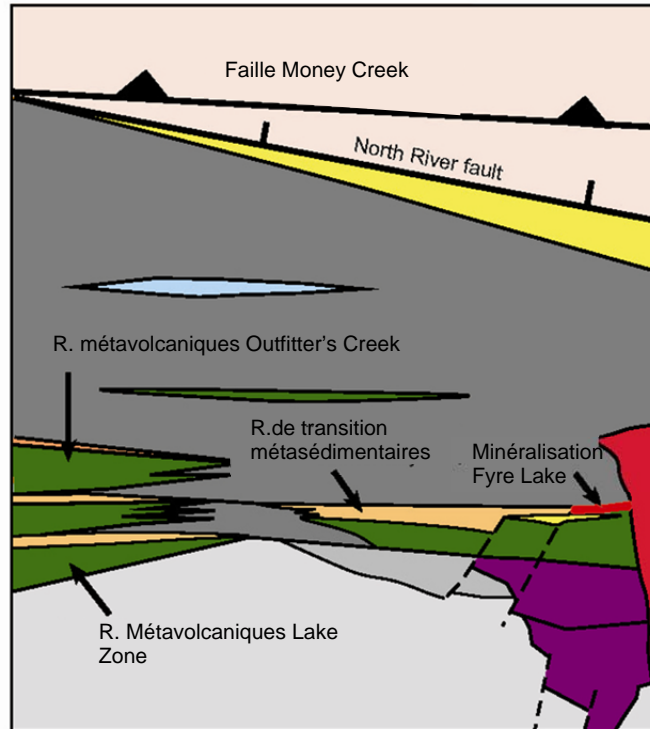
## 2.2 Contexte géologique

Selon la classification de Franklin et al. (2005), la séquence stratigraphique associée au type pélitique-mafique est majoritairement formée de roches sédimentaires de faciès profonds (argilites) et de façon moindre des siltstones et des graywackes. La séquence contient également des roches volcaniques mafiques ou ultramafiques, des cherts et parfois des niveaux de formation de fer. La proportion roches sédimentaires/volcanites peut varier, mais les sulfures massifs sont toujours associés aux roches volcaniques de l'empilement (**Figure 5**). L'ensemble pélites/volcanites mafiques est recoupé par jusqu'à 25 % de filons-couches mafiques/ultramafiques. Les SMV de type pélitique-mafique sont caractérisés par une minéralisation en Zn-Cu avec Pb-Co-Ag-Au. Ces gisements possèdent généralement de forts tonnages comme par exemple le gisement Windy Craggy en Colombie-Britannique qui contient 297 Mt de minerais (Galley et al., 2007).

## 2.3 Signature géophysique

Les SMV de type pélitique-mafique sont généralement constitués de pyrite-pyrrhotite-chalcopyrite-sphalérite-magnétite-galène, un ensemble de minéraux qui possède une bonne conductivité électromagnétique. Cependant, les empilements volcano-sédimentaires encaissant les minéralisations sont caractérisés par de nombreux niveaux d'argilite graphiteuse (**Figure 6**). Ces niveaux graphiteux matérialisent ainsi de nombreux conducteurs géophysiques linéaires régionaux brouillant ainsi le contraste géophysique qui permettrait d'identifier les sulfures si, par exemple, ils étaient encaissés dans

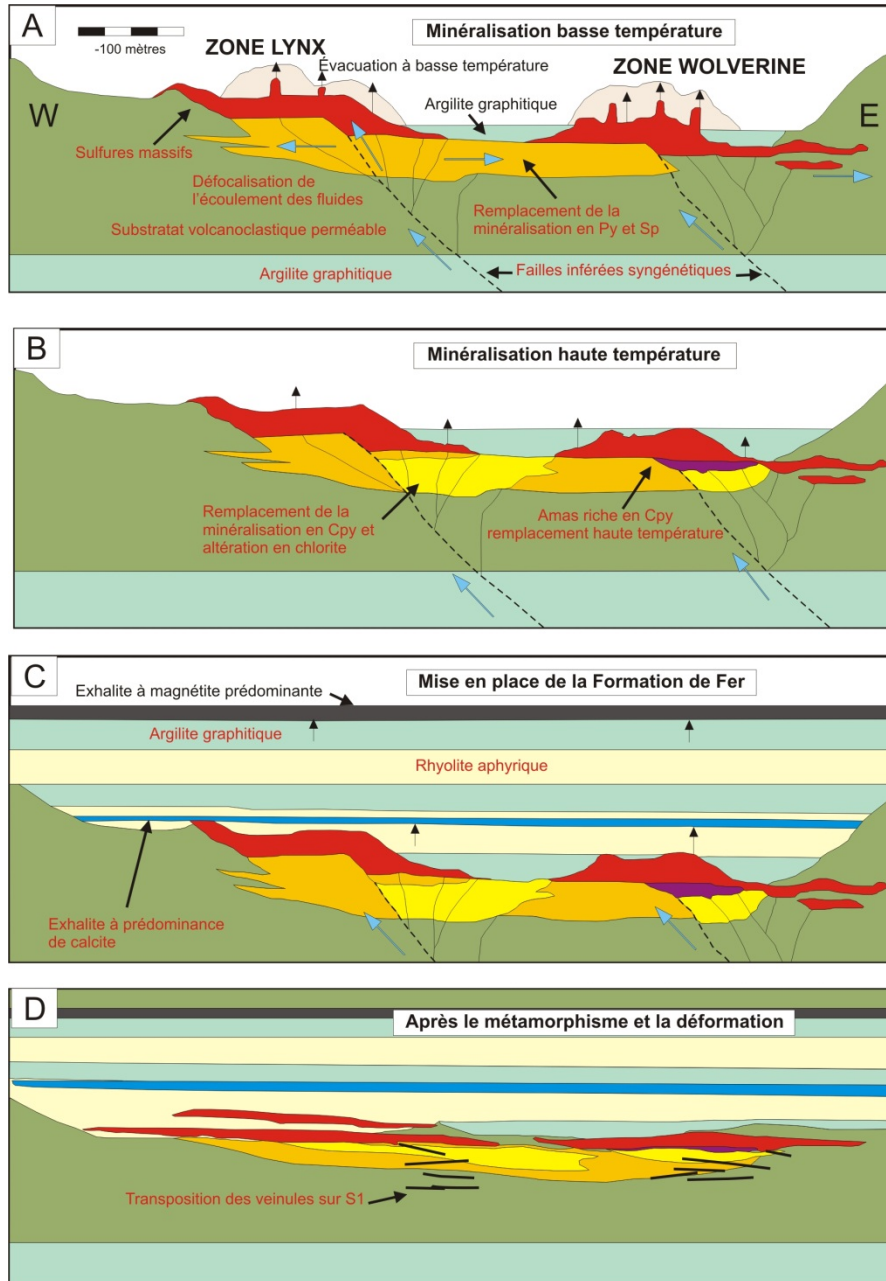
des roches moins conductrices. En plus de ces niveaux graphiteux, la séquence peut être surmontée de formation de fer à magnétite ce qui donne également une réponse géophysique régionale (**Figure 6c**).



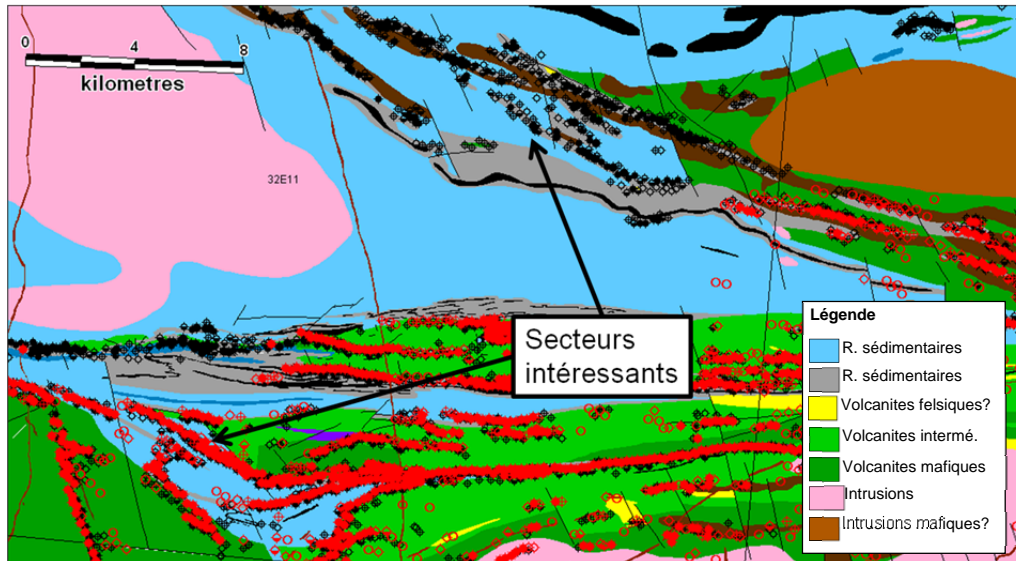
**Figure 5.** Stratigraphie schématique associée au gisement de Fyre Lake, Yukon. La lentille de sulfures est associée aux volcanites mafiques et ultramafiques qui sont présentes au sein des roches sédimentaires. Modifié de Peter et al. (2007).

De très nombreux conducteurs linéaires régionaux de type Input ou MEGATEM (conducteurs électromagnétiques) sont observés en Abitibi le long d'horizons dans les bassins sédimentaires, aux contacts sédiments/volcanites ou aux contacts sédiments/intrusions (**Figure 7**). Or on observe des variations longitudinales de plusieurs caractéristiques des réponses géophysiques le long de ces conducteurs linéaires régionaux. Par exemple, on observe une variation de la constante  $\tau Bx$  (le temps de la décroissance, par un facteur 10, de l'amplitude du champ électromagnétique secondaire) le long des conducteurs linéaires régionaux MEGATEM dans le secteur de la mine Casa Berardi (**Figure 8**). Les données en forages montrent que ces conducteurs sont dus à la présence de graphite, mais aussi de sulfures dans certains cas. L'étude de ces variations pourrait donc aider à discriminer les sulfures par rapport au graphite et ainsi à identifier des cibles d'exploration. On peut notamment se demander si les variations observées sont reliées à :

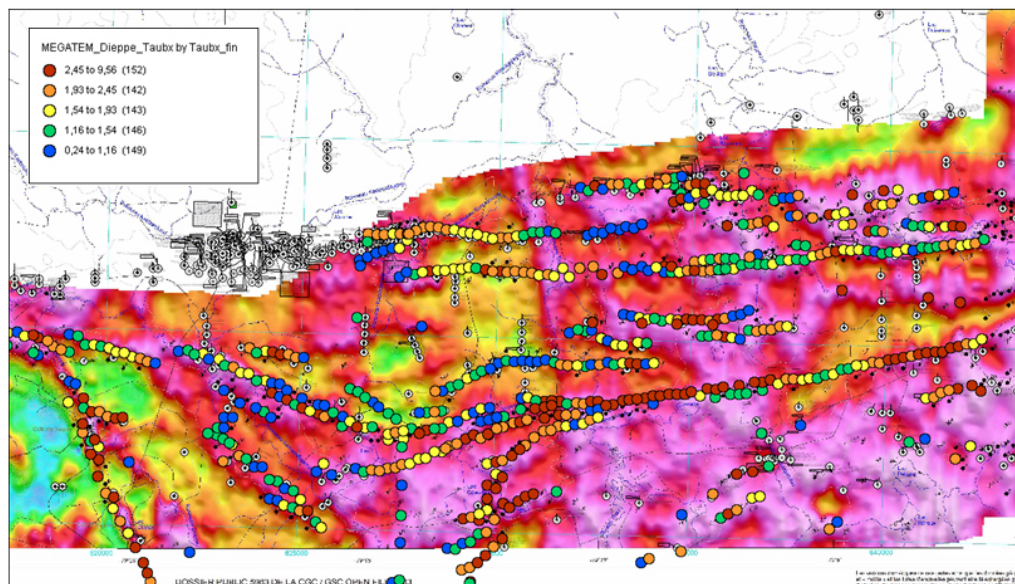
- l'absence et la présence de corps conducteurs;
- le ratio graphite/sulfures;
- le ratio pyrrhotine, pyrite, chalcopryrite, sphalérite;
- l'effet de mort-terrain;
- d'autres causes.



**Figure 6.** Modèle schématique de formation des gisements Lynx et Wolverine du district de Finlayson au Yukon. A) Dépôts hydrothermaux de basse température (200-300 °C) formant des lentilles de sulfures massifs à pyrite-sphalérite-galène-tétrahédrite et des zones de remplacement et stockwerk de pyrite-sphalérite sous les lentilles. La formation de sulfures est contemporaine à l'argilite graphiteuse formant ainsi un horizon conducteur de sulfures et graphites. B) Hydrothermalisme de haute température avec précipitation de chalcoppyrite (265-353 °C) à la base de la lentille et en stockwerk sous la lentille. C) Recouvrement par d'autres horizons d'exhalites, de volcanites et d'argilites graphiteuses et précipitation de formation de fer à magnétite. D) Déformation et métamorphisme. Modifié de Bradshaw et al. (2003).



**Figure 7.** Carte de la géologie et des conducteurs électromagnétiques du secteur de la mine Casa Berardi. La présence de roches sédimentaires (bleu et gris) et de volcanites mafiques (vert) dans l'empilement stratigraphique rendent le secteur intéressant pour les minéralisations de SMV de type pélitiques-mafiques. Les anomalies Input sont identifiées par les cercles noirs alors que les anomalies MEGATEM sont identifiées par les cercles rouges. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).



**Figure 8.** Carte de la conductivité et de la valeur de la constante  $\tau$  Bx dans le secteur de la mine Casa Berardi. Les valeurs du  $\tau$  Bx varient le long des conducteurs linéaires régionaux (points de couleurs). La région est également caractérisée par des variations de conductivité qui sont représentées par l'image «maillée» en arrière-plan. Modifié du DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008 ; carte à la même échelle que la figure 7).

## 2.4 Résumé des caractéristiques clés pour l'exploration

La revue du modèle géologique pour le type pélitique-mafique a permis de faire ressortir les éléments clés permettant d'établir une stratégie d'exploration. Les SMV de type pélitique-mafique sont associés :

- 1) aux bassins avant, arrière ou intra-arc (bassins de suprasubduction) où domine les roches sédimentaires de faciès profonds (argillite, siltstone, wacke) intercalées de laves et filons-couches de basalte ou de komatiite,
- 2) à des niveaux de formation de fer et de chert et
- 3) à des conducteurs électromagnétiques linéaires régionaux.

---

## 3 MÉTHODOLOGIE

---

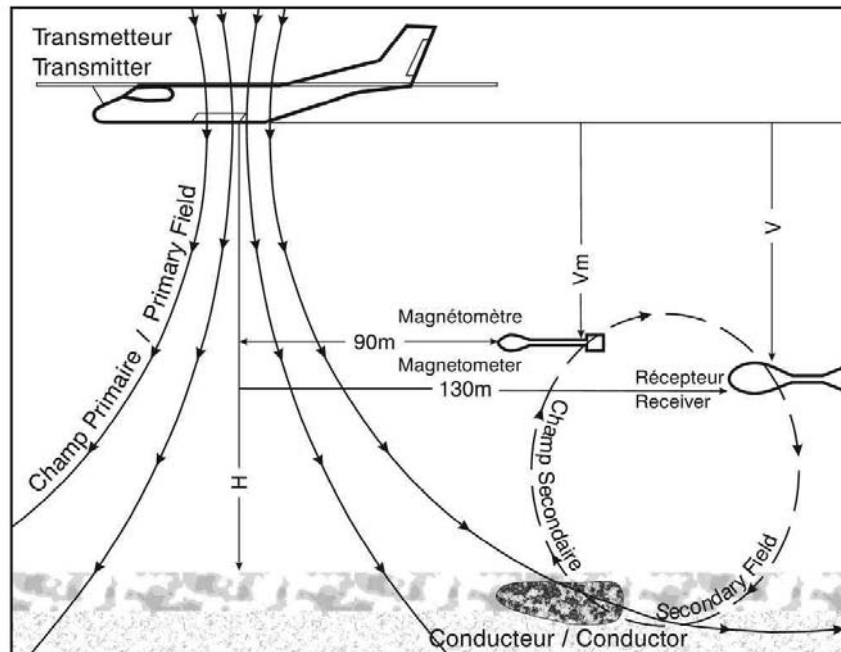
L'objectif principal du projet étant de tenter de distinguer la signature géophysique des sulfures par rapport au graphite, une méthodologie basée sur les levés MEGATEM a été développée. Il s'agit d'établir les corrélations possibles entre les caractéristiques géologiques (graphite, pyrite, pyrrhotine) et géophysiques (mag, dB/dt, champ-B, tau, Tee, conductance) qui expliquent les variations longitudinales de la signature des conducteurs linéaires régionaux en Abitibi.

### 3.1 Le système MEGATEM®II

Le système électromagnétique aéroporté à domaine temporel MEGATEM®II a été développé par Fugro Airborne Surveys. Ce système comporte une boucle émettrice, centrée sur l'avion qui génère un signal électromagnétique primaire alors qu'un récepteur, remorqué sous l'avion, enregistre la réponse des conducteurs souterrains sur 20 fenêtres de temps, quatre fois par seconde, selon trois axes X, Y et Z (**Figure 9**). Le récepteur enregistre en fait les variations, autrement dit la dérivée du champ électromagnétique secondaire (dB/dt) dans le temps, associées aux courants qui sont induits dans le corps conducteur. À partir de cette mesure de dB/dt, il est possible de calculer plusieurs paramètres géophysiques qui caractérisent les réponses obtenues et donc les conducteurs détectés. Par exemple : le champ magnétique secondaire (champ B), la conductance (conductivité X épaisseur du conducteur), la constante de décroissance du champ magnétique secondaire *tau*, la constante TEE (enveloppe d'énergie totale), etc.



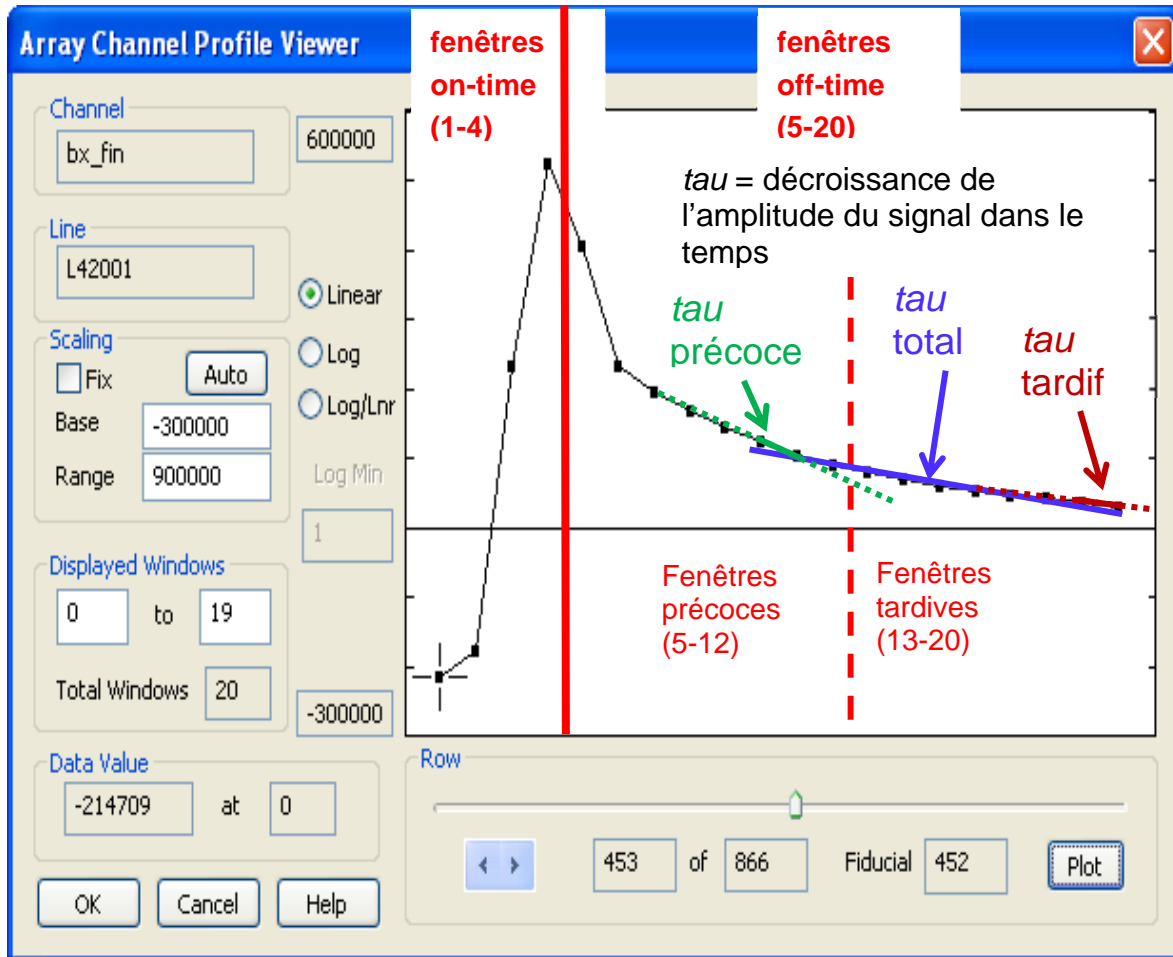
## GÉOMÉTRIE DU SYSTÈME / SYSTEM GEOMETRY



**Figure 9.** Géométrie du système MEGATEM®II de Fugro Airborne Surveys. Tirée du DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).

Pour chaque point de lecture le long d'une ligne de vol l'appareil mesure l'amplitude durant 20 intervalles de temps que l'on appelle fenêtre que l'on peut représenter sur un graphique de profil (**Figure 10**). Il est ensuite possible de diviser ce graphique en trois plages de fenêtres par rapport au temps écoulé à partir du pulse envoyé par l'émetteur. Les fenêtres « on-time » (1 à 4) sont enregistrées durant l'émission du pulse, les fenêtres précoces (5-12) sont enregistrées tout de suite après que l'émetteur soit éteint et les fenêtres tardives (13-20) sont enregistrées avant que l'émetteur soit de nouveau allumé. À partir de ces mesures, on recherche des signaux de conducteurs dans l'intervalle des fenêtres 10 à 20. On dira que le conducteur est moyen si le signal est visible jusqu'aux fenêtres précoces seulement (10-12) et qu'il est bon si le signal persiste jusqu'aux fenêtres tardives (13-20). Les fenêtres 1 à 9 ne sont pratiquement jamais analysées pour la détection des amas de sulfures.

Cependant on voit sur le profil de la **Figure 10** que les fenêtres 1 à 4 (lecture pendant que le courant induit est toujours actif) montrent la plus grande variation dans le signal. Ceci est généralement expliqué par les spécialistes comme des effets de mort-terrain où il y a beaucoup d'interférences. Dans la présente étude, nous nous sommes cependant intéressés à ces fenêtres relativement au contenu en graphite et sulfures des conducteurs.



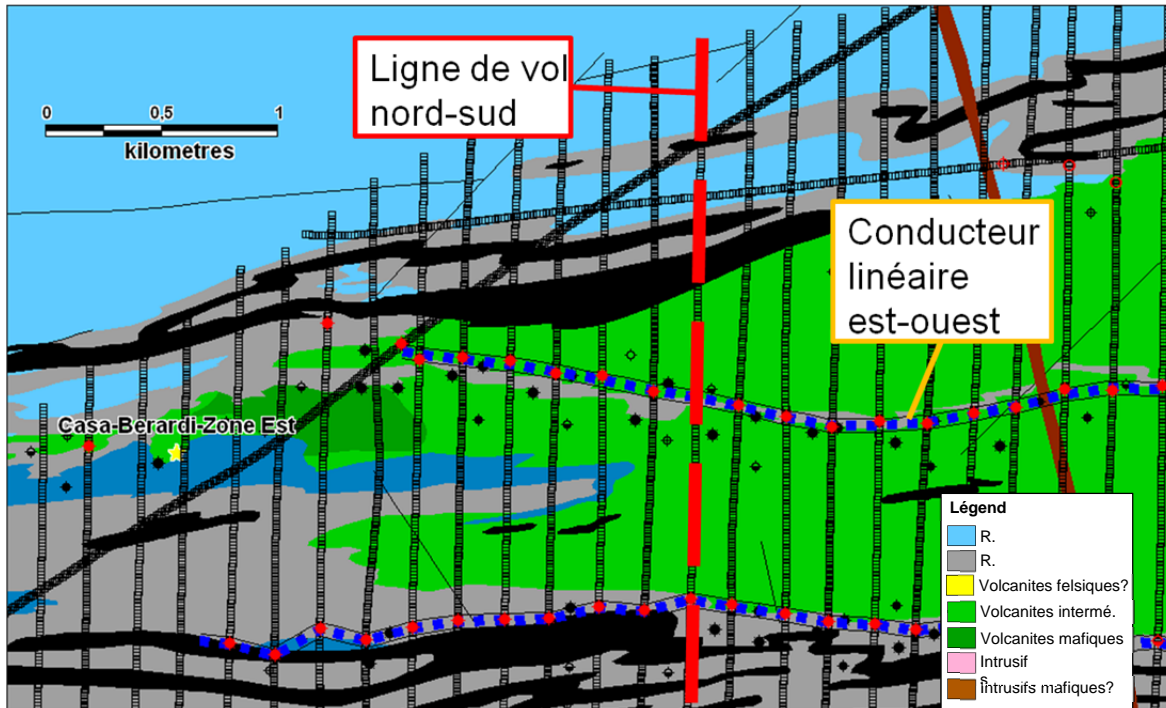
**Figure 10.** Exemple du signal du champ magnétique secondaire (Bx) selon l'axe X associé à un point de mesure lors d'un levé MEGATEM. Le profil provient du logiciel Oasis Montaj de Geosoft. Dans cet exemple, il s'agit du point de lecture 452 sur 866 le long de la ligne de vol L42001. Les carrés noirs représentent le signal pour chacune des vingt fenêtres. Voir le texte pour les explications.

Sur le profil de la **Figure 10** on peut également représenter graphiquement l'évaluation de la constante ( $\tau$ ). Différentes valeurs de  $\tau$  peuvent être obtenues, comme par exemple le  $\tau$  précoce (fenêtres 10-12), le  $\tau$  tardif (fenêtres 18-20) ou le  $\tau$  total (fenêtres 10-20). Ces calculs de  $\tau$  sont d'intérêt puisque plus un conducteur contient des sulfures par rapport au graphite plus les courants induits persistent longtemps tout comme le signal mesuré. En effet, les courants induits dans le graphite s'atténuent presque immédiatement alors que les courants continuent à circuler longtemps dans les sulfures après que l'émetteur soit éteint. Par conséquent, les conducteurs riches en sulfures posséderont une valeur de la constante  $\tau$  plus haute (décroissance plus lente) que les conducteurs à graphite. Le  $\tau$  Bx précoce (fenêtres 10-12) est un nouveau calcul effectué par Michel Allard dans le cadre de cette étude. Les enveloppes d'énergie totale (TEE) pour la fenêtre 12 (énergie totale précoce) et pour la fenêtre 18 (énergie totale tardive) ont également été calculées dans le cadre de cette étude.

### 3.2 Approche novatrice d'analyse des levés

Les levés aéroportés sont toujours effectués perpendiculairement aux strates (et donc aux conducteurs régionaux). La **Figure 11** montre les anomalies MEGATEM identifiées dans le secteur de la mine Casa

Berardi. Lors de ce levé, les lignes de vol étaient nord-sud alors que les anomalies identifiées (point rouges) matérialisent deux conducteurs linéaires est-ouest. Cette façon de faire fait en sorte que l'on compare les anomalies par rapport au bruit de fond le long d'une ligne de vol. Les rapports de levé contiennent donc de nombreux profils de différentes variables présentées le long des lignes de vol.



**Figure 11.** Portion du levé MEGATEM dans le secteur de la mine Casa Berardi. Chaque point de lecture le long des lignes de vol orientées nord-sud est représenté par un carré noir. Les anomalies identifiées le long de ces lignes de vol (points rouges) définissent deux conducteurs linéaires est-ouest. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).

Dans la présente étude, nous voulons cependant tenter d'isoler le signal du graphite par rapport aux sulfures et non pas par rapport au bruit de fond. Nous avons donc choisi de comparer les variations de signal de façon longitudinale aux conducteurs est-ouest plutôt que nord-sud. **De cette façon on effectue la comparaison des anomalies entre elles plutôt que par rapport au bruit de fond.** Ceci implique qu'il faut extraire les données associées aux anomalies de chaque ligne de vol individuellement pour reconstruire une base de données « longitudinale ». La démarche est expliquée dans la prochaine section.

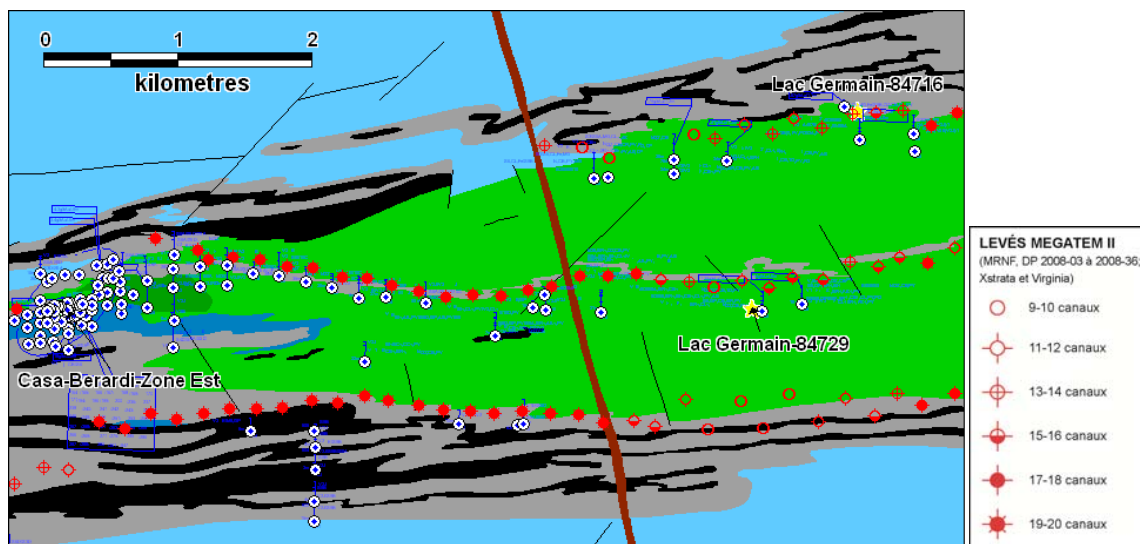
### 3.3 Construction de la base de données d'anomalies MEGATEM linéaires

L'extraction des données MEGATEM linéaires et des données géologiques en forage dans le but de construire la base de données s'effectue en 3 étapes :

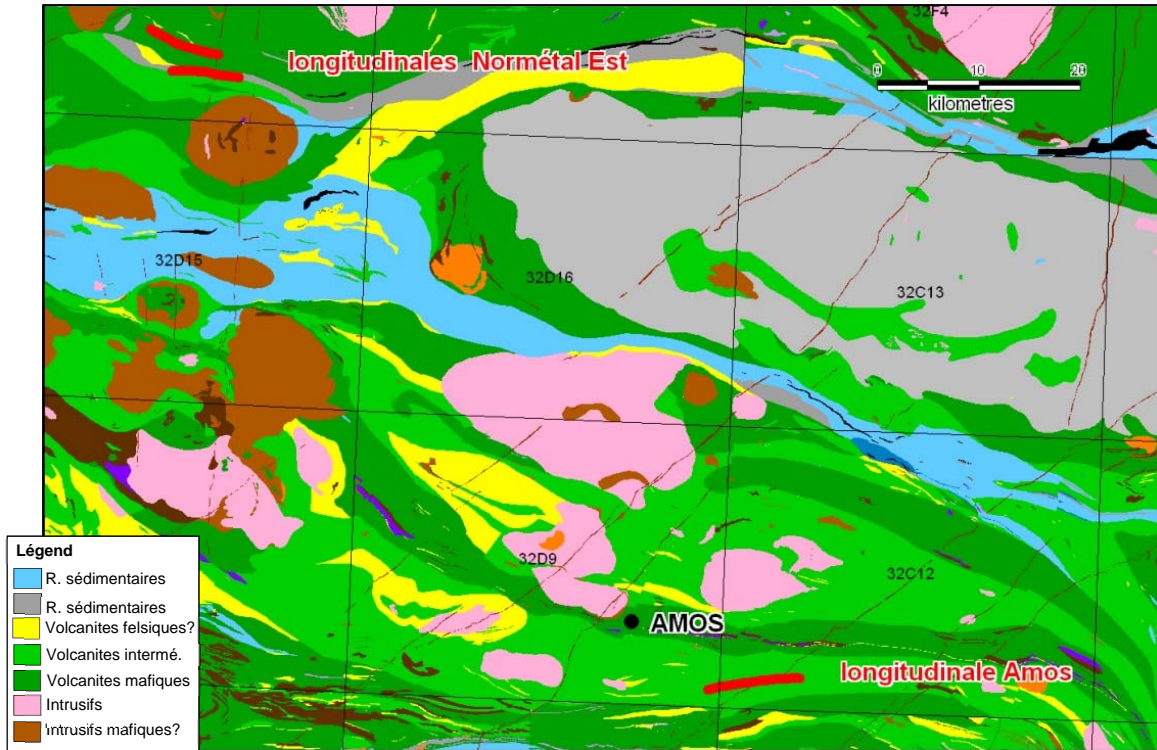
1. Choix des longitudinales;
2. Extraction des données géophysiques associées aux anomalies;
3. Synthèse des descriptions en forages.

Le choix des longitudinales représentait un défi important puisqu'il fallait trouver des secteurs avec plusieurs intersections de forages qui présentaient des variations de contenu en graphite, pyrite et pyrrhotite le long du même conducteur linéaire dans un environnement pélitique-mafique. Cinq longitudinales ont finalement été retenues, deux dans le secteur de Casa Berardi (**Figure 12**), deux dans le secteur à l'est de Normétal et une dans le secteur d'Amos (**Figure 13**).

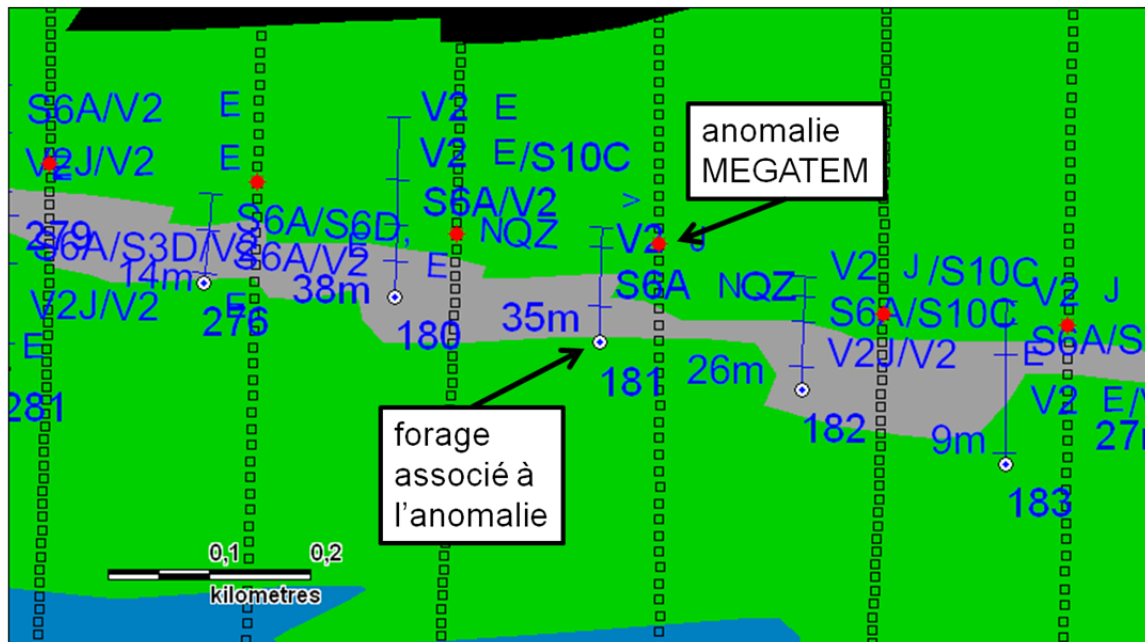
La prochaine étape consistait à associer les informations géophysiques de l'anomalie avec les informations géologiques du forage qui est spatialement le plus près (**Figure 14**). Les données géophysiques ont été extraites une à la fois à partir des levés MEGATEM de Fugro avec l'aide du logiciel Oasis Montaj de Geosoft. Les informations géologiques des forages dans le SIGEOM n'étaient pas assez précises pour les besoins de cette étude, il a donc fallu retourner dans les descriptions originales des forages (travaux statutaires). La relecture des journaux de sondage et l'observation des sections de forage ont été nécessaires pour arriver à associer les paramètres géophysiques avec le bon conducteur dans chaque forage et donc le bon contenu en minéraux conducteurs.



**Figure 12.** Forages et anomalies MEGATEM du secteur de la mine Casa Berardi. Les collets de forage et leurs traces sont en bleu, les anomalies sont représentées par les symboles rouges. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).

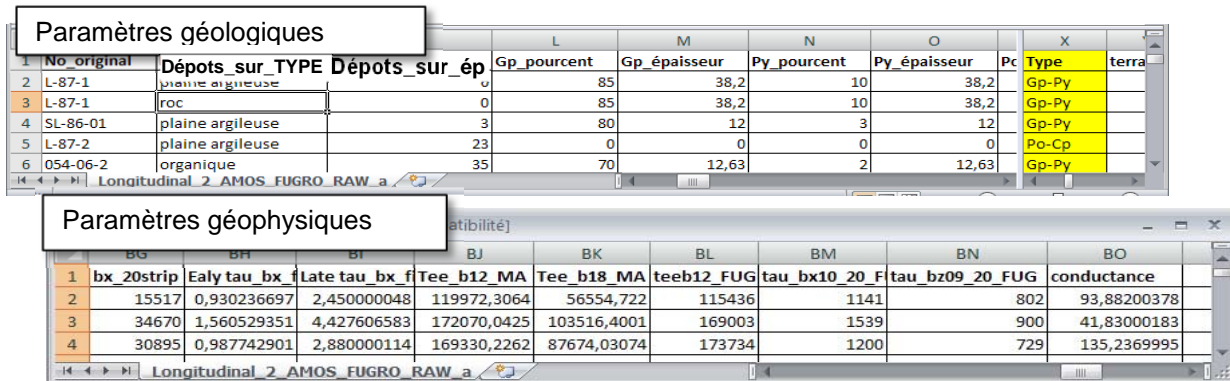


**Figure 13.** Localisation des longitudinales des secteurs Normetal Est et d'Amos. Géologie modifiée du SIGEOM (2009).



**Figure 14.** Corrélation spatiale entre les forages et les anomalies MEGATEM. Les collets de forage et leurs traces sont en bleu, les anomalies sont représentées par les symboles rouges. Tous les journaux de sondage ainsi que les sections de forages ont été consultés afin de rattacher le bon conducteur avec l'anomalie MEGATEM la plus proche. Modifié du SIGEOM et de DP 2008-24 (Commission géologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2008).

La base de données finale contient 58 paramètres géophysiques ou géologiques réunis dans le même tableau (**Figure 15**). Les paramètres géophysiques incluent les mesures du champ magnétique, les mesures dB/dt pour différentes fenêtres, le champ magnétique secondaire Bx, différents calculs de la constante *tau*, le Tee et la conductance. Les informations géologiques ont été compilées à partir de 44 forages. Chaque intersection conductrice a été décrite en termes de pourcentage et d'épaisseur de graphite (Gp), pyrite (Py), pyrrhotine (Po), chalcopryrite (Cp) et magnétite (Mt). Cette description des proportions de minéraux conducteurs a permis de classer les intersections conductrices en 10 types : Gp, Gp-Py, Py-Gp, Py, Py-Po, Po-Cp, Po, Po-Mt, Mt, Gp-Mt-Py. Le type et l'épaisseur des dépôts meubles ont aussi été compilés. Cette nouvelle base de données a permis de tenter d'établir des corrélations entre les caractéristiques géophysiques et les caractéristiques géologiques.



No original	Dépôts sur TYPE	Dépôts sur ép	Gp pourcent	Gp épaisseur	Py pourcent	Py épaisseur	Pc	Type	terra
L-87-1	plaine argileuse	0	85	38,2	10	38,2		Gp-Py	
L-87-1	roc	0	85	38,2	10	38,2		Gp-Py	
SL-86-01	plaine argileuse	3	80	12	3	12		Gp-Py	
L-87-2	plaine argileuse	23	0	0	0	0		Po-Cp	
054-06-2	organique	35	70	12,63	2	12,63		Gp-Py	

	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO
1	bx_20strip	Ealy tau_bx	Late tau_bx	Tee_b12_MA	Tee_b18_MA	teeb12_FUG	tau_bx10_20	F tau_bz09_20_FUG	conductance
2	15517	0,930236697	2,450000048	119972,3064	56554,722	115436	1141	802	93,88200378
3	34670	1,560529351	4,427606583	172070,0425	103516,4001	169003	1539	900	41,83000183
4	30895	0,987742901	2,880000114	169330,2262	87674,03074	173734	1200	729	135,2369995

**Figure 15.** Compilation des paramètres géophysique et géologique dans une base de données unique. Seules deux portions de la base de données sont présentées, mais la base de données contient en fait 58 variables (colonnes) impossibles à représenter ici. Les variables géophysiques proviennent des levés MEGATEM de Fugro. La compilation des pourcentages et épaisseurs des minéraux conducteurs a permis de classer chaque intersection en 10 différents types selon les proportions des minéraux (colonne soulignée en jaune).

## 4 CORRÉLATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES GÉOPHYSIQUES ET GÉOLOGIQUES

Une approche utilisant l'analyse en composantes principales (ACP) a été favorisée dans le but de tenter d'établir certaines corrélations entre les paramètres géologiques et géophysiques. Puisque les données géophysiques sont plus ou moins continues le long des 5 longitudinales (n=253) et que nous avons des données géologiques pour 44 forages, l'analyse a été effectuée sur deux bases de données distinctes. La première analyse visait à voir les relations entre les paramètres géophysiques seulement alors que la deuxième explorait les paramètres géophysiques et géologiques.

### 4.1 Analyse en composantes principales des paramètres géophysiques

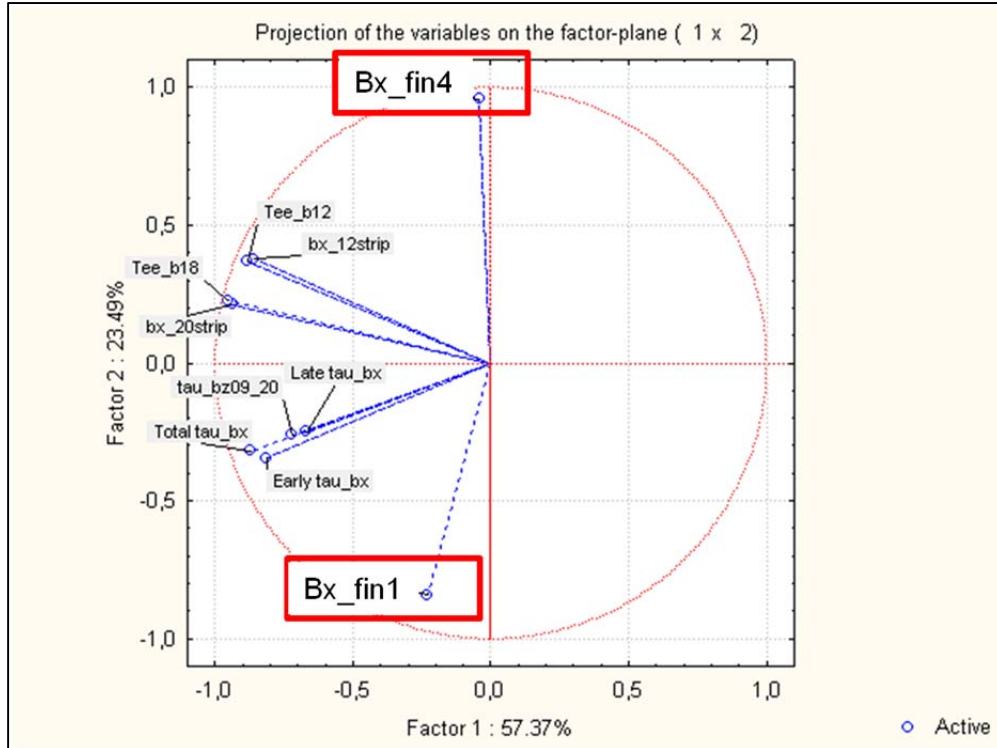
Onze paramètres géophysiques ont été choisis pour l'analyse en composantes principales (**Figure 16**), dont trois qui sont des nouveaux calculs effectués dans le cadre de cette étude à partir des données brutes. Tous les points de lecture (n=253) se trouvant le long des 5 longitudinales ont été utilisés pour cette analyse.

Paramètres	Signification
Champ-Bx fenêtre 1 Champ-Bx fenêtre 4	Fenêtres « on-time »
Champ-Bx fenêtre 12	Fenêtres précoces
Champ-Bx fenêtre 16 Champ-Bx fenêtre 20	Fenêtres tardives
$\tau$ Bx précoce (fenêtres 10-12) <i>(nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Décroissance fenêtres précoces
$\tau$ Bx tardif (fenêtres 18-20)	Décroissance fenêtres tardives
$\tau$ Bx total (fenêtres 10-20)	Décroissance fenêtres précoces à tardives
Tee B12 (fenêtre 12) <i>(nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Énergie totale fenêtres précoces
Tee B18 (fenêtre 18) <i>(nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Énergie totale fenêtres tardives
$\tau$ Bz total (fenêtres 9-20)	Décroissance fenêtres précoces à tardives selon l'axe z

**Figure 16.** Choix des 11 paramètres géophysiques choisis pour effectuer l'analyse en composante principale. Trois des paramètres sont des nouveaux calculs effectués dans le cadre de cette étude à partir des données brutes.

Nous avons utilisé les données du champ magnétique secondaire (champ-Bx) pour les fenêtres « on-time », précoces et tardives de façon à avoir l'étendue complète du signal. Trois valeurs pour la constante  $\tau$  (précoce, tardif et précoce à tardif) ont aussi été comparées. Des valeurs d'énergie totale et de la constante  $\tau$  selon l'axe Z ont aussi été choisies. Le résultat montre que la composante 1 explique 57,37 % de la variance et que toutes les variables ont plus ou moins le même comportement (**Figure 17**). L'analyse montre également que la composante 2 explique 23,49 % des variations et que le champ-Bx de la fenêtre 4 est en opposition avec le champ-Bx de la fenêtre 1 (**Figure 17**). On peut donc interpréter une valeur positive de la composante 2 comme étant un champ-Bx4 élevé et un champ-Bx1 bas et vice-versa pour une valeur négative de la composante 2.

Il est par la suite possible de faire un graphique de boîte à moustaches pour voir la relation entre la valeur de la composante 2 par rapport aux 10 types de conducteurs établis à partir de la description des 44 forages (**Figure 18**). Une première observation est que les concentrations en sulfures sous les 10 %, qui représentent des minéralisations disséminées plutôt que massives à semi-massives, ne sont pas significatives pour la conductivité EM. On voit donc que le 3 % de Po disséminée (même si c'est sur plus de 30 m d'épaisseur) ne possède pas la même valeur que les échantillons contenant de 10 à 15 % de Po massive.

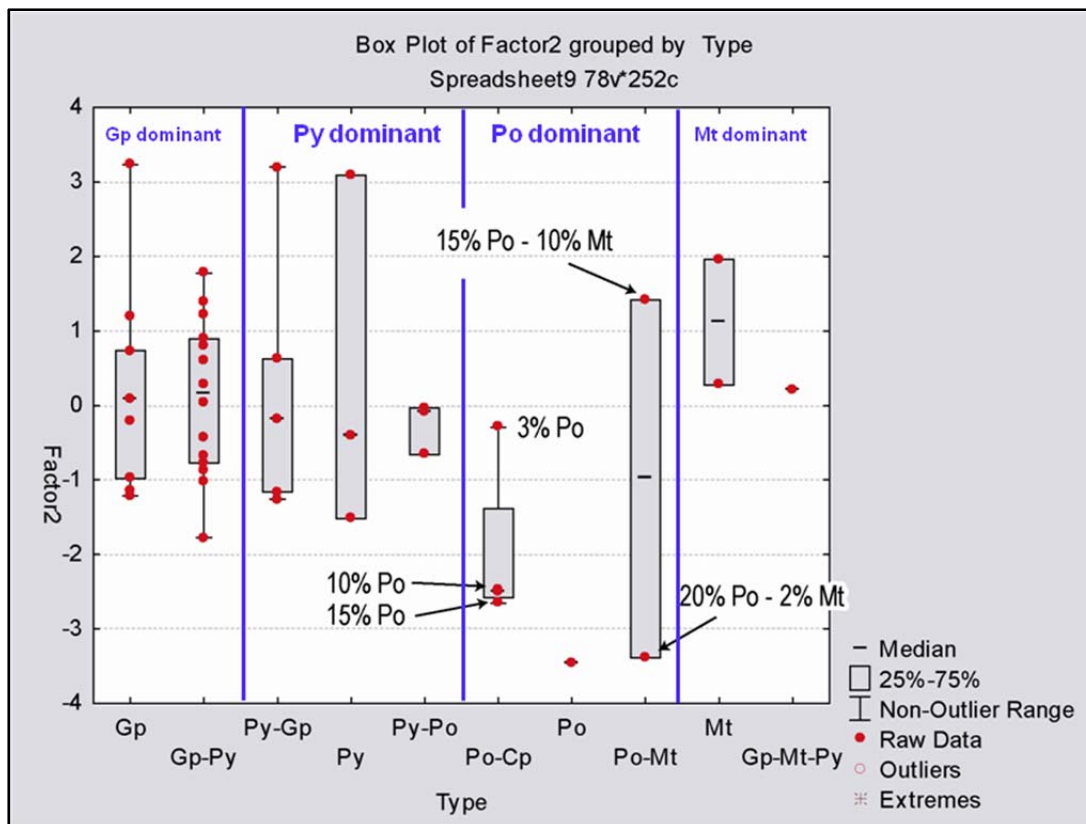


**Figure 17.** Projection des composantes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales des variables géophysiques.

Pour cette raison, l'échantillon contenant 3 % Po (qui avait été volontairement choisi dans le but de comparer des minéralisations disséminées avec des minéralisations massives) sera retiré des données pour les analyses subséquentes.

On voit également sur ce graphique que les proportions relatives d'un minéral par rapport à l'autre dans les conducteurs polyminéraux sont importantes. L'échantillon qui contient 20 % Po et 2 % de Mt possède le même signal que les conducteurs à Po alors que l'échantillon contenant 15 % Po et 10 % Mt se comporte comme les conducteurs à Mt. Il semble donc qu'il faut tenir compte à la fois des proportions (10 pour 1 *versus* 1,5 pour 1) et de la susceptibilité magnétique des différents minéraux (magnétite 1 000 fois plus susceptible que la Po; Allard et Bois, 1999) pour tenter de classer le signal. Il serait intéressant de faire une étude de plusieurs autres cas afin de déterminer à partir de quelle proportion de Po vs Mt le signal passe d'un type à l'autre. Dans notre cas, l'échantillon contenant 20 % Po et 2 % Mt est donc reclassé dans le type de conducteur à Po.

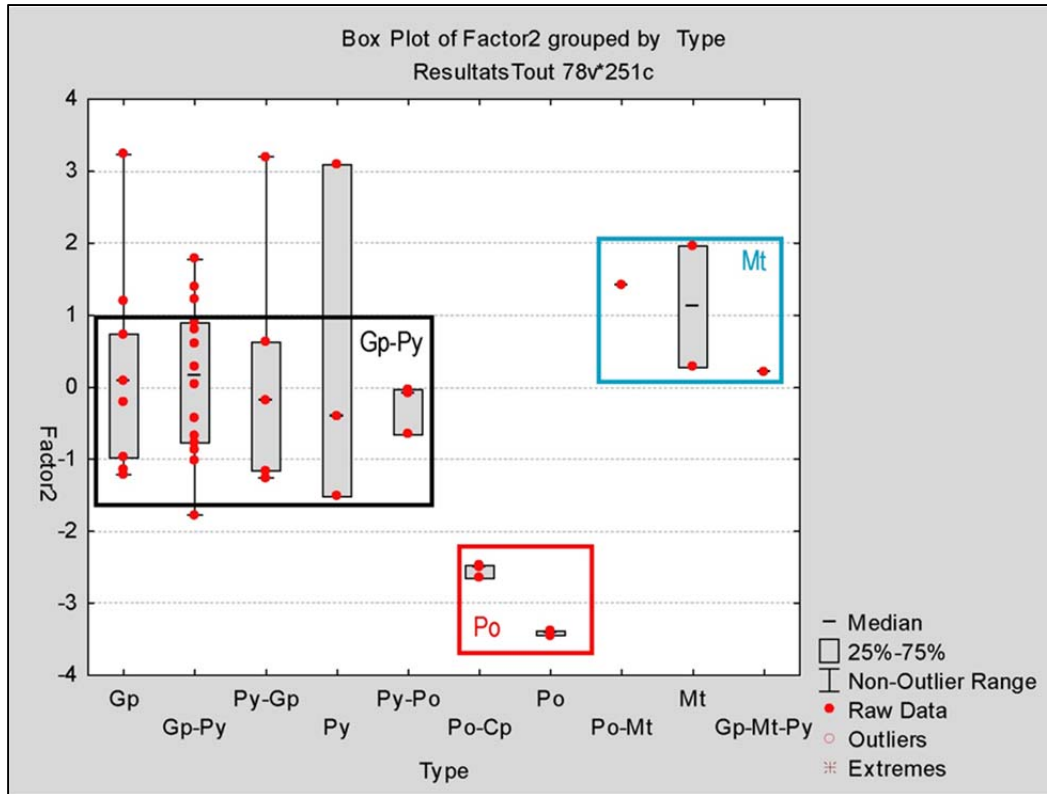




**Figure 18.** Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des différents types de conducteurs. Les 10 types de conducteurs décrits en forages sont regroupés selon 4 divisions qui reposent sur le minéral dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotine; Cp=chalcopyrite; Mt=magnétite).

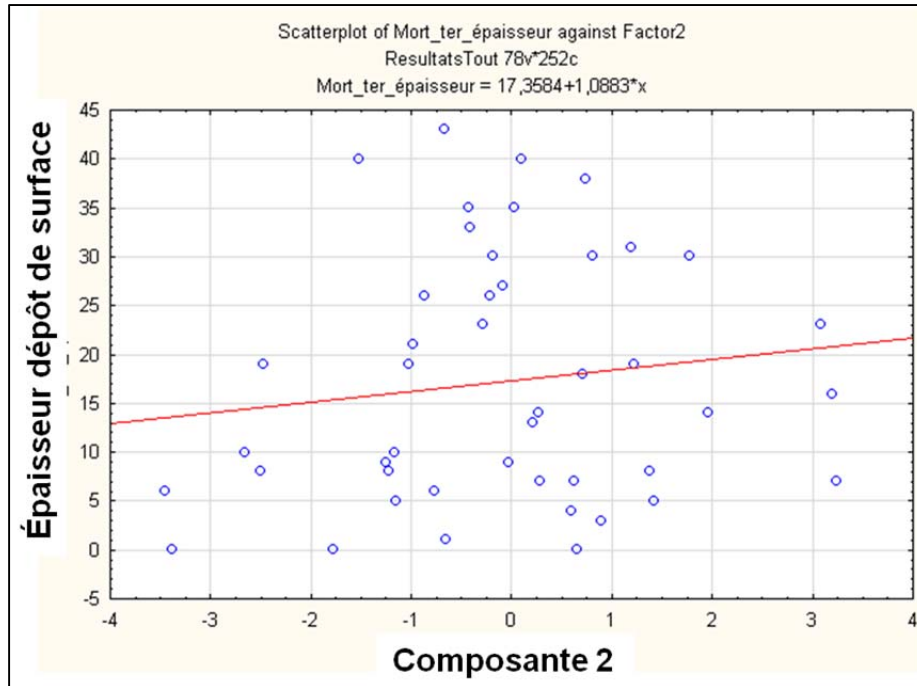
On peut par la suite refaire le même graphique de boîte à moustaches en tenant compte de ces modifications (**Figure 19**). Sur ce graphique, il est évident que la valeur de la composante 2 permet de distinguer les conducteurs selon trois groupes basés sur le contenu en Gp-Py, Po et Mt. C'est donc les conducteurs à Po qui possèdent la valeur de composante 2 la plus négative et par conséquent la valeur Bx1 la plus haute combinée à la valeur Bx4 la plus basse (**Figure 17**).

Ces observations reposent cependant sur l'analyse en composantes principales effectuée à partir des 11 paramètres choisis seulement (**Figure 16**). Il est donc nécessaire de voir si la valeur de la composante 2 peut être influencée par d'autres variables. Par exemple, il est souvent mentionné que le signal des fenêtres « on-time » (fenêtres 1 à 5) peut être perturbé par les dépôts meubles conducteurs (p. ex. Sharp et Murray, 2002). L'épaisseur des dépôts meubles ainsi que le type de dépôts de surface, qui ont été compilés dans la base de données, ont donc été comparés à la valeur de la composante 2.

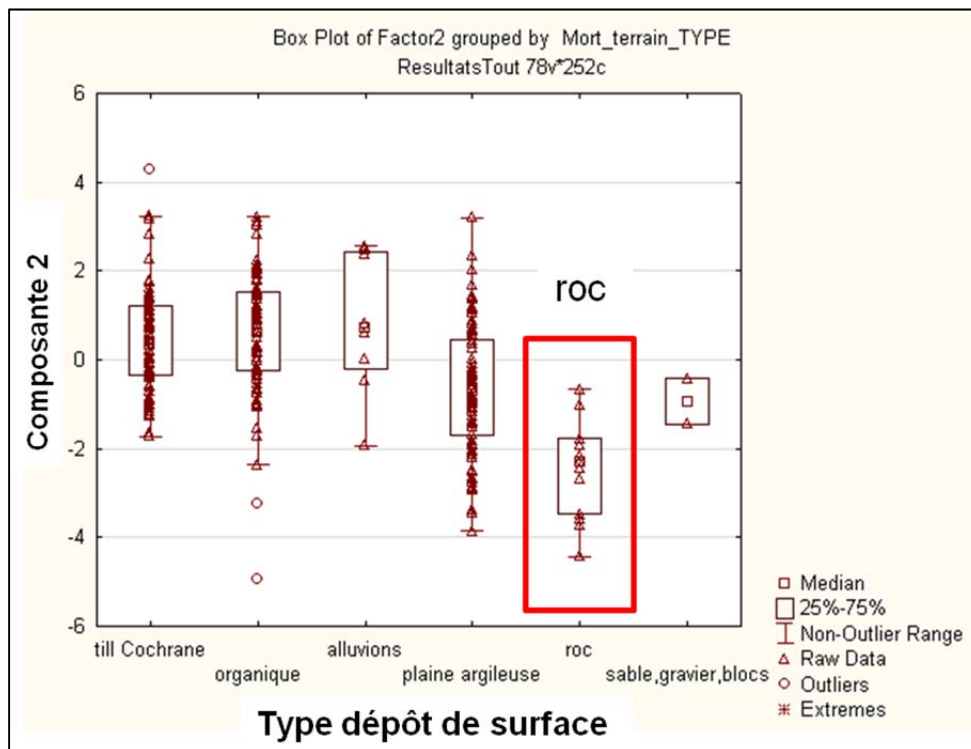


**Figure 19.** Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des groupes minéraux dominants. La valeur de la composante 2 permet de discriminer les conducteurs à Po dominante par rapport aux conducteurs à Gp-Py et à Mt dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotine; Cp=chalcopyrite; Mt=magnétite).

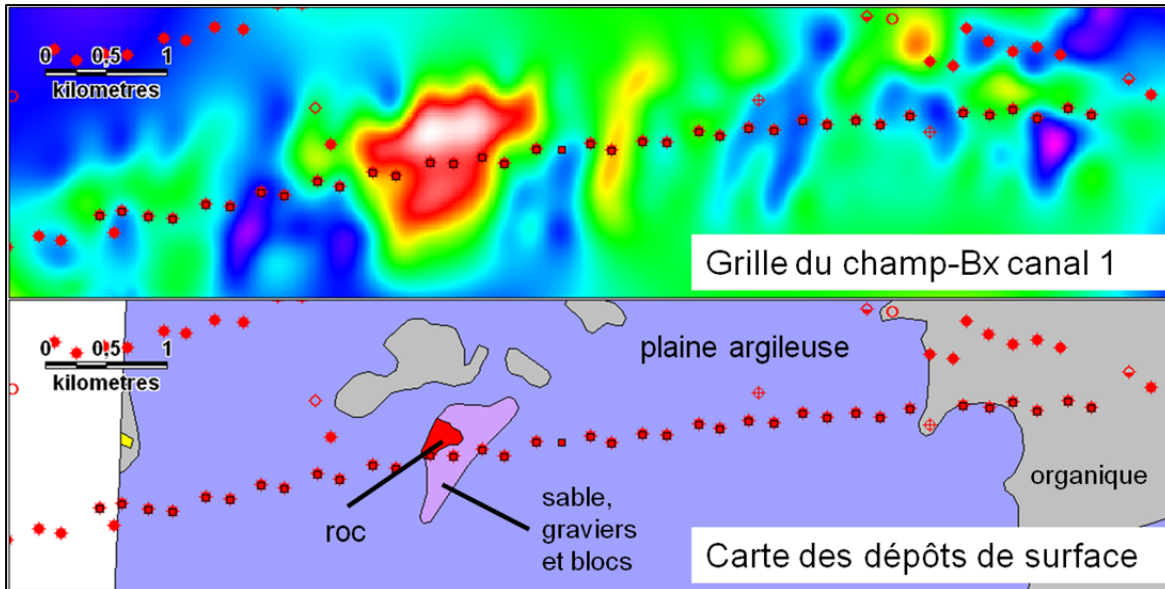
Il semble que l'épaisseur des dépôts n'a pas d'influence sur la valeur de la composante 2 (**Figure 20**). Par contre la présence de roc par rapport à divers types de dépôts meubles est associée aux valeurs de composante 2 les plus basses (**Figure 21**). Cette relation est notamment bien visible pour les données de la longitudinale du secteur d'Amos où les valeurs élevées du champ-Bx de la fenêtre 1 sont corrélables avec la présence de roc (**Figure 22**). Il faudrait donc étudier d'autres cas pour voir si les valeurs de composante 2 basses sont associées à la présence de roc ou à la présence de pyrrhotine.



**Figure 20.** Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts meubles par rapport aux valeurs de la composante 2.



**Figure 21.** Diagramme de boîte à moustaches de la composante 2 en fonction des types de dépôts de surface.



**Figure 22.** Valeurs du champ Bx1 et types de dépôts de surface associés à la longitudinale du secteur d'Amos. A) Grille des valeurs du champ magnétique secondaire Bx1. B) Carte des dépôts de surface (modifié de Veillette et al., 2003). Les valeurs élevées de Bx1 sont corrélables avec la présence de roc. Par contre, il existe des variations du champ Bx1 qui ne s'expliquent pas seulement par le type de dépôt. Il existe par exemple des variations significatives à l'intérieur de la plaine argileuse.

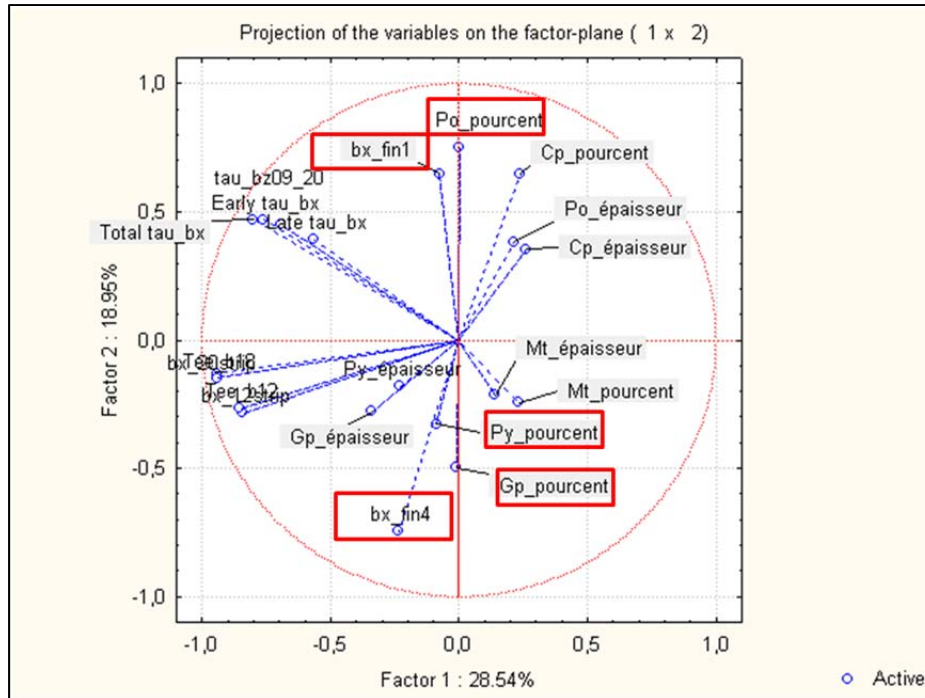
## 4.2 Analyse en composantes principales des paramètres géologiques et géophysiques

Une deuxième analyse en composantes principales a été effectuée cette fois, à partir des points de lecture géophysique qui sont associés à un forage (n=42). Vingt paramètres géophysiques et géologiques ont été choisis pour l'analyse en composantes principales (**Figure 23**).

Paramètres	Signification
Champ-Bx fenêtre 1 Champ-Bx fenêtre 4	Fenêtres « on-time »
Champ-Bx fenêtre12	Fenêtres précoces
Champ-Bx fenêtre18	Fenêtres tardives
<i>tau Bx précoce (fenêtres10-12) (nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Décroissance fenêtres précoces
<i>tau Bx tardif (fenêtres 18-20)</i>	Décroissance fenêtres tardives
<i>tau Bx total (fenêtres 10-20)</i>	Décroissance fenêtres précoces à tardives
<i>Tee B (fenêtre12) (nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Énergie totale fenêtres précoces
<i>Tee B (fenêtre 18) (nouveau calcul de Michel Allard)</i>	Énergie totale fenêtres tardives
<i>tau Bz total (fenêtres 9-20)</i>	Décroissance fenêtres précoces à tardives selon l'axe z
Pourcentage et épaisseur de graphite (Gp), pyrite (Py), pyrrhotine (Po), magnétite (Mt), chalcopyrite (Cp)	Conductivité des différents minéraux

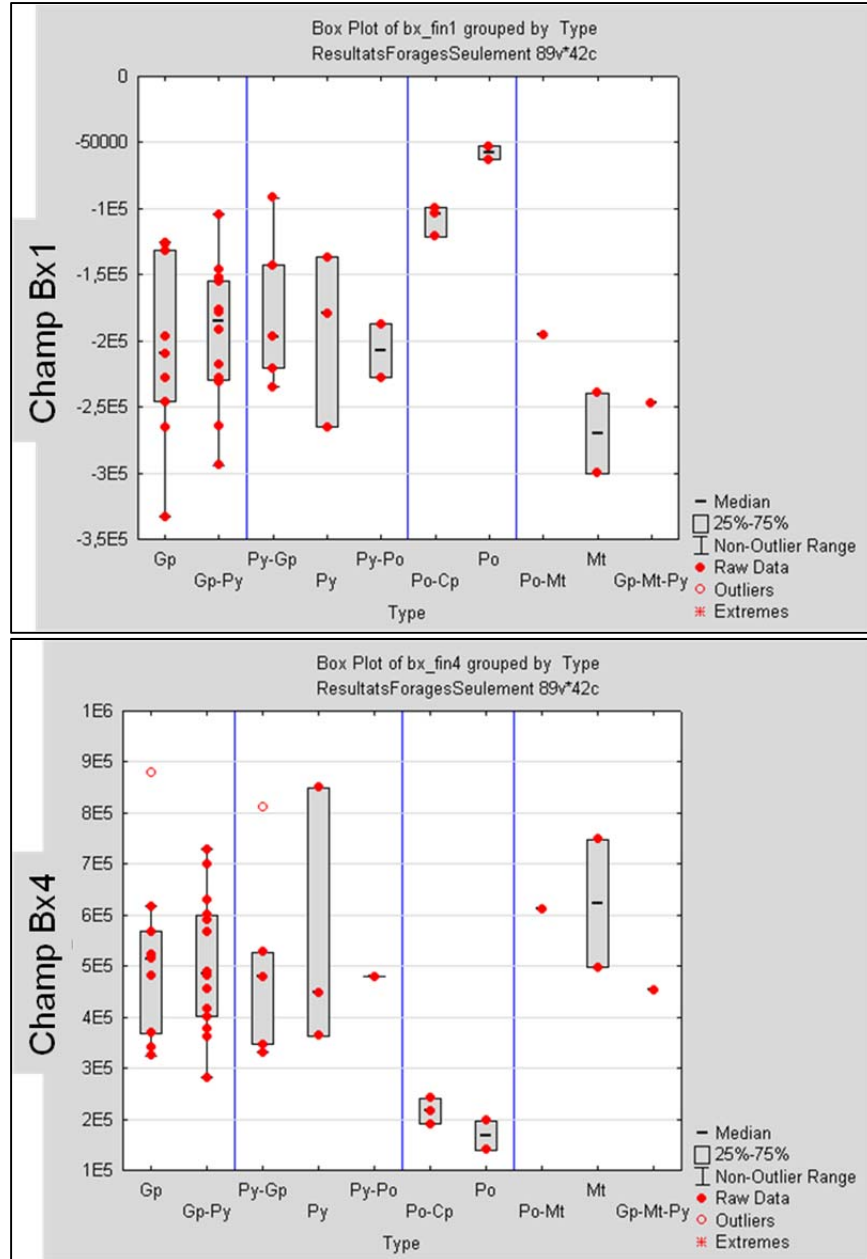
**Figure 23.** Choix des 20 paramètres géophysiques et géologiques choisis pour effectuer l'analyse en composante principale. Trois des paramètres sont des nouveaux calculs effectués dans le cadre de cette étude à partir des données brutes.

Le résultat de l'ACP montre que la composante 1 explique 28,54 % des variations et que ceci reflète globalement une opposition entre les variables géophysiques et géologiques (**Figure 24**). La composante 2 met en opposition le pourcentage de pyrrhotine et le champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 1 par rapport aux pourcentages de pyrite et graphite et le champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 4 (**Figure 24**). Ces résultats confirment donc les conclusions tirées de l'ACP des variables géophysiques selon lesquelles les conducteurs à pyrrhotine possèdent un champ Bx1 élevé et un champ Bx4 bas par rapport aux conducteurs à pyrite et graphite. Cette relation peut aussi être montrée sur des diagrammes de boîte à moustaches (**Figure 25**). Sur le diagramme pour le champ Bx1, les conducteurs à Po possèdent des valeurs entre -100 000 et -50 000 alors que les conducteurs à Py-Gp ont des valeurs d'environ -250 000 en moyenne. Sur le diagramme pour le champ Bx4, les conducteurs à Po ont des valeurs autour de 200 000 alors que les conducteurs à Py-Gp ont des valeurs moyennes d'environ 500 000. On peut donc suggérer à partir de ces données que les conducteurs ayant la différence en valeurs absolues  $|Bx4-Bx1|$  la plus petite sont les conducteurs à Po ( $200\ 000 - (-50\ 000) = 250\ 000$ ). Inversement les conducteurs à Py-Gp possèdent des valeurs  $|Bx4-Bx1|$  plus élevés ( $500\ 000 - (-250\ 000) = 750\ 000$ ) alors que les conducteurs à Mt ont les valeurs les plus hautes (875 000).

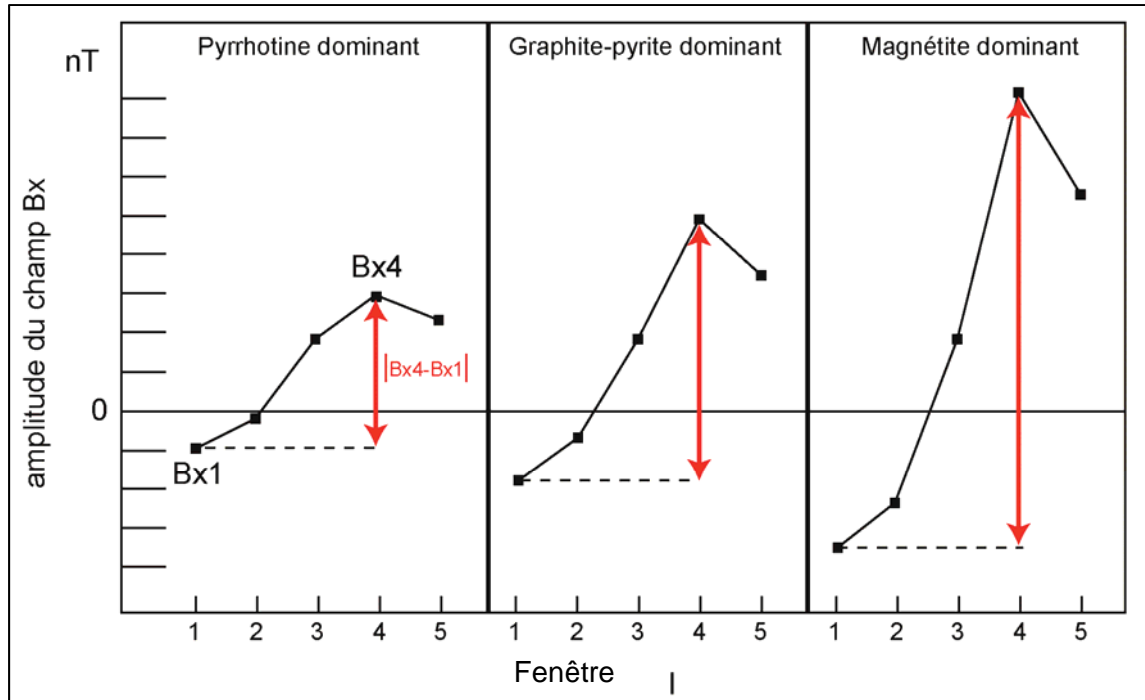


**Figure 24.** Projection des composantes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales pour les paramètres géologiques et géophysiques. Voir la liste des paramètres à la figure 23.

Cette relation aura donc une influence sur la géométrie théorique des profils observés lors des levés MEGATEM selon les différents contenus en minéraux des conducteurs. Ceci peut être représenté sur un diagramme de profils théoriques montrant la valeur du champ-Bx pour les différentes fenêtres 1 à 5 (**Figure 26**). Sur cette figure on voit que les conducteurs à Po dominante possèdent la plus petite différence  $|Bx_4 - Bx_1|$ , suivi ensuite des conducteurs à Gp-Py et enfin des conducteurs à Mt dominante qui possèdent la plus grande différence  $|Bx_4 - Bx_1|$ . Il faut noter qu'il s'agit ici de profils relatifs établis lorsque l'on compare des anomalies avec d'autres anomalies et non pas en comparant des anomalies avec les valeurs du bruit de fond. Les valeurs  $|Bx_4 - Bx_1|$  pour chaque point de lecture le long d'un conducteur linéaire régional pourraient donc être utilisées pour discriminer la présence de pyrrhotine par rapport à la pyrite-graphite et à la magnétite. La compilation des variables géophysiques directement associées aux variables géologiques telle qu'effectuée dans cette étude permet donc d'associer directement des pourcentages de certains minéraux avec la réponse MEGATEM.



**Figure 25.** Diagramme de boîte à moustaches des champs Bx1 et Bx4 en fonction des différents types de conducteurs. Les 10 types de conducteurs décrits en forages sont regroupés selon 4 divisions qui reposent sur le minéral dominant (Gp=graphite; Py=pyrite; Po=pyrrhotite; Cp=chalcopyrite; Mt=magnétite).



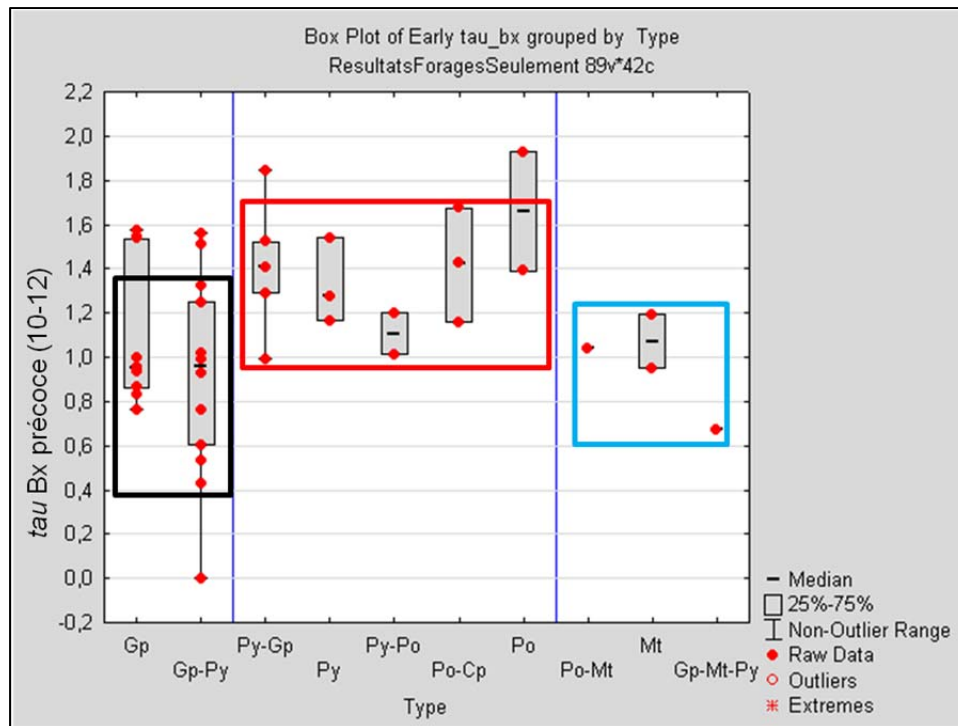
**Figure 26.** Profils théoriques du champ Bx des fenêtres 1 à 5 pour les différents types de conducteurs. Ces profils ont été construits à partir des résultats de l'analyse en composantes principales qui suggèrent que les conducteurs à pyrrhotine possèdent la différence  $|Bx4 - Bx1|$  la moins grande. Il faut faire le calcul en valeurs absolues puisque Bx1 est négatif et que Bx4 est positif.

### 4.3 Autres relations entre paramètres géophysiques et géologiques

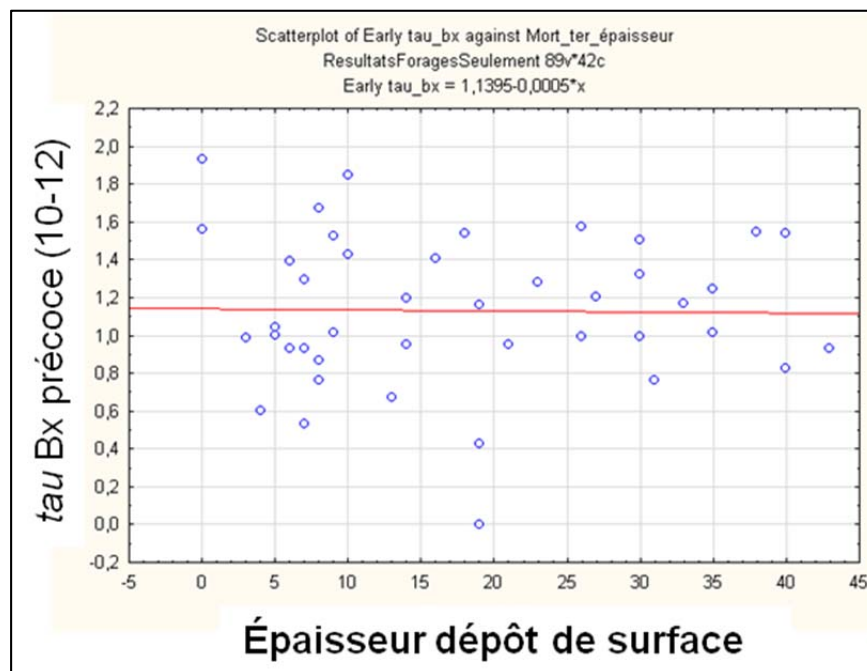
Un autre résultat intéressant de la comparaison entre paramètres géophysiques et géologiques est le lien entre les types de conducteurs et la constante de décroissance du champ magnétique secondaire  $\tau$  calculée pour les fenêtres précoces (10-12). Cette constante a été calculée spécifiquement dans le cadre de ce projet et elle n'est généralement pas calculée lors des levés. En effet, c'est généralement seulement la décroissance sur l'ensemble des fenêtres, soit le  $\tau$  Bx total des fenêtres 10 à 20, qui est calculé; **Figure 10**). Par contre comme décrit précédemment, il existe des variations importantes du signal dans les fenêtres précoces, c'est pourquoi nous avons aussi calculé la décroissance  $\tau$  Bx (10-12). Les résultats suggèrent que la constante  $\tau$  Bx précoce (10-12) discrimine partiellement les conducteurs à sulfures (Py-Po) par rapport aux conducteurs à graphite ou à magnétite (**Figure 27**). La constante  $\tau$  représente le temps nécessaire pour que le signal décroisse d'un facteur 10. Étant donné que le courant électrique continue de circuler plus longtemps dans les conducteurs à sulfures lorsque le courant est coupé, ils possèdent des valeurs  $\tau$  Bx (10-12) plus élevées (décroissance plus lente).

Ces résultats concernent les fenêtres précoces et il est reconnu que le signal dans ces fenêtres peut être sensible aux dépôts de surfaces conducteurs. Nous avons donc étudié la relation entre le  $\tau$  Bx précoce (10-12) et l'épaisseur des dépôts de surfaces conducteurs. On peut observer sur le diagramme de la **Figure 28** qu'il n'y a pas de relation entre ces deux variables, ce qui laisse supposer que les variations de  $\tau$  Bx (10-12) puissent être associées à la minéralogie des conducteurs.



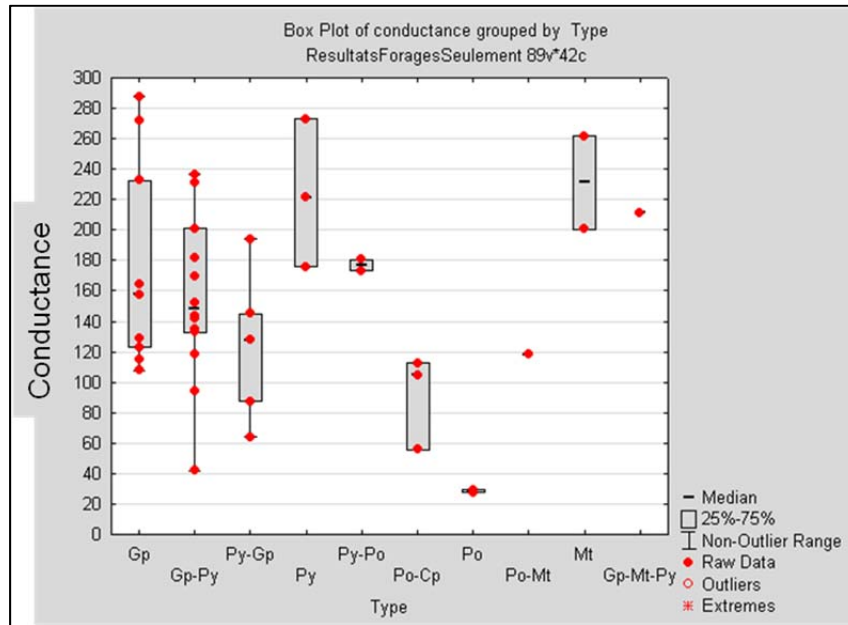


**Figure 27.** Diagramme de boîte à moustaches de la valeur de la constante  $\tau$  Bx précoce (10-12) en fonction des différents types de conducteurs. Les conducteurs à sulfures (Py-Po) possèdent une valeur  $\tau$  Bx (10-12) significativement plus élevée que pour les conducteurs à graphite ou à magnétite. La constante  $\tau$  Bx (10-12) a été calculée spécialement dans le cadre de cette étude et n'est généralement pas regardée lors des levés.

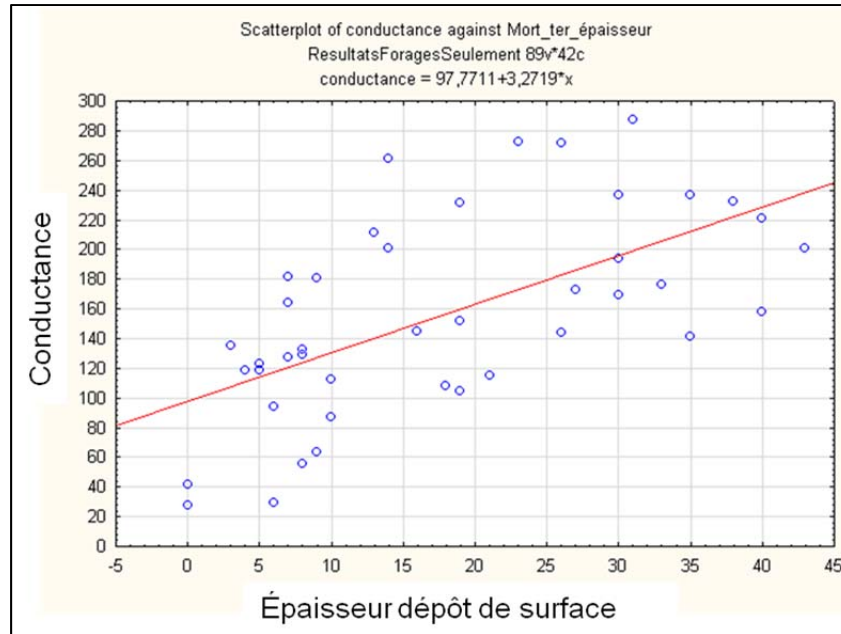


**Figure 28.** Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts de surface par rapport aux valeurs de la constante  $\tau$  Bx pour les fenêtres précoces (10-12).

La conductance (conductivité multipliée par l'épaisseur du conducteur) qui est une variable souvent analysée lors des levés MEGATEM a aussi été mise en relation avec les types de conducteurs et l'épaisseur des dépôts de surface. Sur le graphique de boîte à moustaches (**Figure 29**) il semble que les conducteurs à Po puissent posséder une conductance légèrement plus basse que les autres, par contre on voit bien sur le diagramme binaire (**Figure 30**) que la valeur de la conductance est directement associée avec l'épaisseur des dépôts de surface. En fait il est reconnu que la conductance donne un maximum d'information sur la conductivité près de la surface (Sharp et Murray, 2002). Les interprétations faites à partir des cartes de conductance produites lors des levés peuvent donc être problématiques dans les secteurs où les dépôts de surface sont conducteurs.



**Figure 29.** Diagramme de boîte à moustaches de la valeur de la conductance en fonction des différents types de conducteurs.



**Figure 30.** Graphique binaire de l'épaisseur des dépôts de surface par rapport à la conductance. Il existe une corrélation très claire entre les deux variables.

#### 4.4 Résumé de l'analyse en composante principale

L'analyse en composante principale des paramètres géophysiques et géologiques a été forte utile pour arriver à définir deux observations significatives à propos du lien entre certaines valeurs géophysiques et le type de conducteur selon sa minéralogie.

En résumé les paramètres significatifs qui permettent la distinction entre différents conducteurs régionaux linéaires sont :

- 1) *Tau Bx* précoce (10-12) (calculé dans le cadre de cette étude) pour discriminer les conducteurs à sulfures Py-Po par rapport aux conducteurs à graphite ou magnétite.

**Sulfures = *tau Bx* (10-12) élevé**

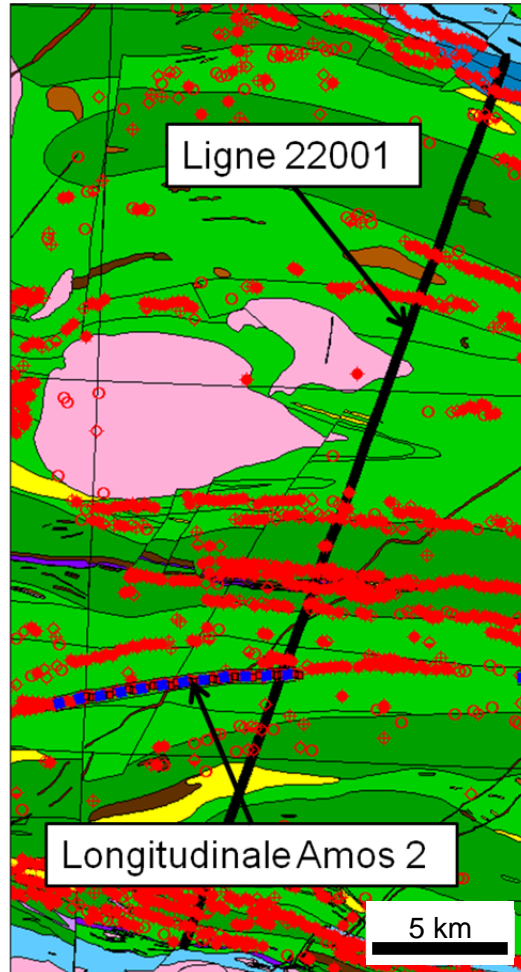
- 2) La différence d'intensité du champ magnétique secondaire Bx entre les fenêtres 1 et 4 pour discriminer les conducteurs à Po par rapport aux autres.

**Po = |Bx4-Bx1| petite**

## 5 TEST D'APPLICATION DES RÉSULTATS

Les conclusions tirées de l'analyse en composantes principales, soient l'utilisation de la différence |Bx4-Bx1| et du *tau Bx* précoce (10-12) afin de caractériser les anomalies MEGATEM, ont été testées sur le levé de la région d'Amos. Dans le but de décrire toute la logique d'analyse des résultats suivant un levé MEGATEM, nous avons comparé les valeurs du levé selon une approche classique le long de la ligne nord-sud 22001 avec les valeurs d'une longitudinale est-ouest (longitudinale Amos 2) construite dans le cadre de cette étude (**Figure 31**).

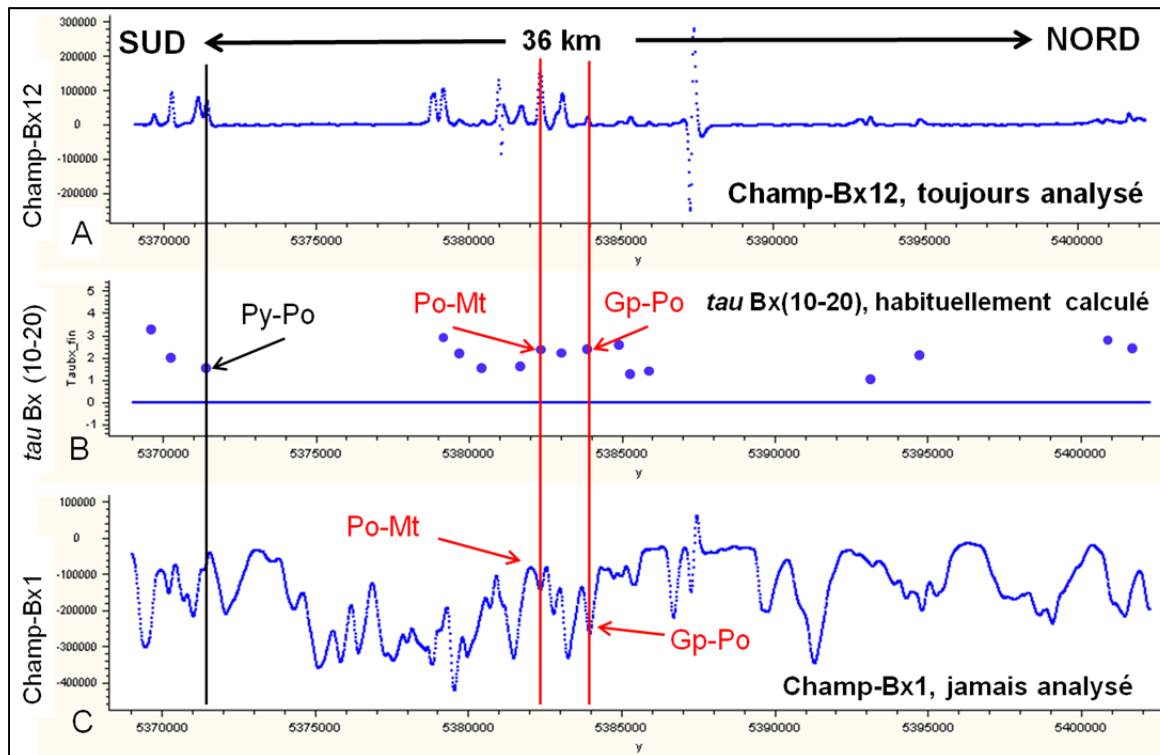
La ligne nord-sud est une des lignes de vol où les mesures ont été prélevées lors du levé aérien. C'est à partir de ces valeurs dB/dt que les géophysiciens déterminent s'il y a des anomalies ou non le long de chaque ligne de vol. Généralement les anomalies sont sélectionnées en regardant l'amplitude du signal des fenêtres 12 à 20 (**Figure 32a**). Dans notre exemple, 17 anomalies ont été identifiées, ce qui correspond aux cercles rouges le long de la ligne 22001 de la **Figure 31** ou aux 17 pics visibles sur la **Figure 32a**. Par la suite le  $\tau$  total Bx (10-20) pour chaque anomalie identifiée est calculé (**Figure 32b**).



**Figure 31.** Localisation de la longitudinale Amos 2. La longitudinale représente un des conducteurs linéaires régionaux est-ouest qui sont définis par un alignement d'anomalies identifiées le long des lignes de vol nord-sud. La ligne de vol 22001 représente un exemple des lignes de vol nord-sud espacées aux 200 m qui ont été réalisées lors du levé MEGATEM.

Les anomalies avec une valeur élevée de  $\tau$  total Bx (10-20) sont qualifiées comme étant les meilleures. On voit cependant que pour des anomalies semblables selon la valeur du  $\tau$  Bx (10-20), il existe des variations importantes dans les valeurs du champ Bx de la fenêtre 1 (**Figure 32b-c**). En effet, les deux anomalies identifiées par les lignes verticales rouges (une à Po-Mt et l'autre à Gp-Po, **Figure 32**) ont une valeur de  $\tau$  Bx (10-20) semblable d'environ 2. Par contre l'anomalie à Po-Mt possède une valeur de Bx1 élevée (-100 000) alors que l'anomalie à Gp-Po possède une valeur de Bx1 basse (-275 000). Ces observations sont en accord avec les conclusions tirées de l'analyse en composantes principales présentées dans la section précédente (voir la **Figure 25**) selon lesquelles les conducteurs à Po possèdent les valeurs Bx1 les plus élevées. On voit donc que l'observation du  $\tau$  Bx (10-20) le long des lignes de vol nord-sud permet de distinguer des anomalies par rapport au bruit de fond, mais ne permet

pas nécessairement de discriminer les différents types de conducteur responsables des anomalies. Ceci serait pourtant souhaitable dans le but de choisir des cibles de forages à sulfures plutôt qu'à graphite.



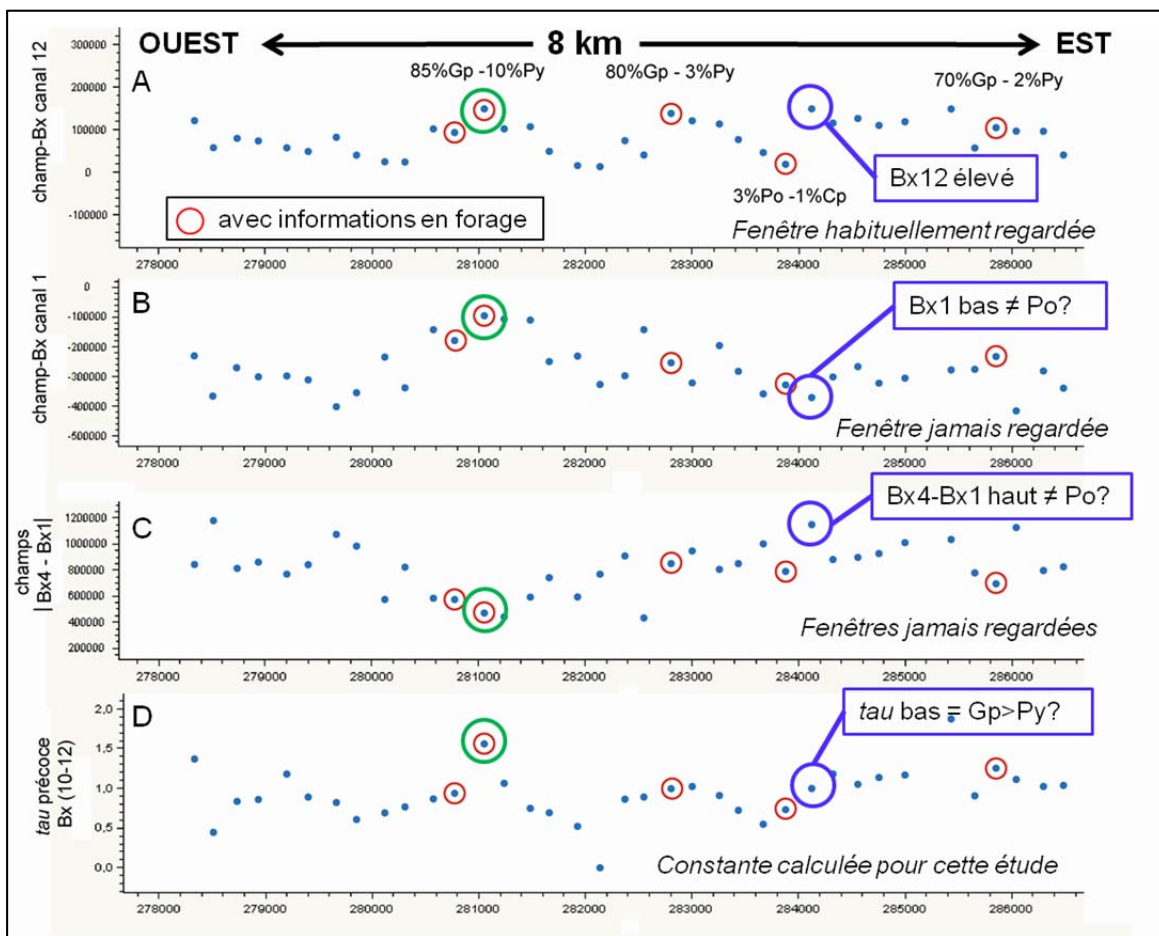
**Figure 32.** Variables géophysiques associées à la ligne de vol nord-sud 22001. A) Mesures du champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 12. La sélection des anomalies se fait à partir de la position des pics par rapport au bruit de fond. B) Valeur de la constante  $\tau$  Bx calculée pour l'ensemble des fenêtres (10-20). C) Variations importantes du champ magnétique secondaire Bx1. Les deux conducteurs dominés par la pyrrhotine (Po-Mt) et la pyrite (Py-Po) possèdent une valeur élevée alors que le conducteur dominé par le graphite (Gp-Po) a une valeur plus basse. Les lignes verticales sont des repères pour pouvoir comparer la même station de prise de mesure d'un graphique à l'autre.

Il est donc proposé qu'après le traitement habituel d'identification des anomalies par rapport au bruit de fond (ce qui est fait après chaque levé MEGATEM) il soit nécessaire de comparer les anomalies entre-elles (approche innovatrice, section 3.2). Ceci serait fait dans le but d'identifier les anomalies à sulfures et particulièrement celles à pyrrhotine puisque la chalcoppyrite est généralement associée à cette dernière. La **Figure 33** regroupe les informations de 4 variables associées aux anomalies présentes sur 8 km le long de la longitudinale est-ouest Amos 2 (localisée sur la **Figure 31**). Les contenus en minéraux associés aux 5 forages qui recoupent cette longitudinale sont aussi présentés. La longitudinale recoupe 45 lignes de vols espacées aux 200 mètres à partir desquelles 37 anomalies ont été identifiées par Fugro Airborne Surveys définissant ainsi un conducteur linéaire régional. Tous les points bleus de la **Figure 33** sont donc les 37 anomalies identifiées à partir des lignes nord-sud et il est donc possible de les comparer entre elles.

La **Figure 33a** montre les valeurs du champ Bx12, une valeur utilisée pour identifier les anomalies (p.ex., **Figure 32a**). Une des anomalies avec la valeur Bx12 la plus élevée (d'environ 150 000) a été forée et elle contient 85%Gp-10%Py (identifiée par le cercle vert). On voit qu'il y a également une autre anomalie avec la même valeur (identifiée par le cercle bleu) et cette anomalie serait, avec une approche classique, sûrement identifiée comme la prochaine cible de forage.

Par contre si on utilise la démarche développée dans cette étude il est possible de confirmer son potentiel ou non. La méthode consiste à observer les valeurs des champs Bx1 et Bx4 (fenêtres « on-time ») et les valeurs  $\tau$  Bx (10-12) des différentes anomalies. Nous avons établi précédemment que les conducteurs à Po possèdent des valeurs de champ Bx1 élevées et de champ Bx4 basses (**Figure 25**). Par conséquent les conducteurs à Po possèdent une différence  $|Bx4-Bx1|$  petite (**Figure 26**). Nous avons aussi établi que les conducteurs à sulfures (Po-Py) possèdent des valeurs de  $\tau$  Bx (10-12) plus élevées que pour les conducteurs à Gp et Mt. Si on recherche ces caractéristiques pour les anomalies de la longitudinale, on voit que c'est effectivement l'anomalie la plus riche en sulfures (cercle vert, 10 % Py selon les informations en forage) qui possède le champ Bx1 le plus élevé (**Figure 33b**), la différence  $|Bx4-Bx1|$  la plus basse (**Figure 33c**) et le  $\tau$  Bx (10-12) le plus élevé (**Figure 33d**). Par contre l'anomalie identifiée par le cercle bleu qui semble intéressante selon sa valeur de champ Bx 12 (**Figure 33a**) possède une différence  $|Bx4-Bx1|$  élevée (**Figure 33c**) et une valeur de  $\tau$  Bx (10-12) basse (**Figure 33d**) suggérant ainsi qu'elle contient encore moins de sulfures que l'anomalie identifiée par le cercle vert, qui elle ne contenait que 10 % de Py. Ces caractéristiques suggèrent que cette anomalie contient probablement encore plus de Gp et moins de Po que l'anomalie identifiée par le cercle vert, ce qui en fait une cible finalement très peu intéressante.

En fait la longitudinale ne contient probablement pas de conducteurs avec une quantité significative de sulfures que l'on pourrait associer à une lentille de SMV de type pélimitique-mafique. Ainsi une fois que le forage de l'anomalie identifiée par le cercle vert avait été complété, on aurait pu savoir que les autres anomalies sont de plus piètre qualité et ainsi éviter de faire trois forages supplémentaires.



**Figure 33.** Variables géophysiques associées à la longitudinale Amos 2. Les points bleus sont les anomalies sélectionnées à partir des lignes nord-sud vues le long de la longitudinale. Les cercles rouges

sont les anomalies que l'on peut associer avec une description géologique en forage. Les cercles vert et bleu servent à comparer deux anomalies qui possèdent la même valeur de champ-Bx12. Voir le texte pour les explications. A) Mesures du champ magnétique secondaire Bx de la fenêtre 12. B) Variations du champ magnétique secondaire Bx1. C) Différence en valeur absolue des champs secondaires « on-time » Bx4 et Bx1. D) Valeur de la constante  $\tau$  précoce pour les fenêtres 10-12. Cette valeur a été calculée spécifiquement pour cette étude puisque généralement c'est le  $\tau$  Bx total (10-20) qui est présenté suite aux levés.

---

## 6 CONCLUSION

---

Ce projet a permis de développer une méthodologie pour l'exploration des SMV de type pélitique-mafique qui repose sur l'analyse du signal des levés MEGATEM. L'objectif de discriminer les conducteurs à sulfures par rapport à ceux de graphite a été atteint en utilisant une approche novatrice qui consiste à comparer les anomalies entre elles le long de conducteurs longitudinaux régionaux plutôt que le long de lignes de vol perpendiculaires aux contacts géologiques. Les informations géophysiques des anomalies réparties le long des conducteurs longitudinaux ont été comparées avec les caractéristiques géologiques décrites en forage. Les corrélations possibles entre les variables géophysiques et géologiques ont été identifiées par une approche d'analyse en composante principale.

Les résultats de l'analyse en composantes principale ont permis de faire ressortir l'importance du signal dans les fenêtres 1 à 12 du levé, ceux-ci étant généralement laissés de côté au profit des fenêtres 12 à 20. Suite à l'identification de l'importance des fenêtres précoces, la constante  $\tau$  Bx (10-12) a été calculée spécifiquement dans le cadre de cette étude. La démarche a permis d'identifier deux variables géophysiques qui semblent être utiles pour expliquer le lien qui existe entre celles-ci et le type de conducteur selon sa minéralogie. Les conducteurs à pyrrhotine sont caractérisés par une différence  $|Bx4 - Bx1|$  petite par rapport aux conducteurs à pyrite, graphite et magnétite. Les conducteurs à sulfures (Po-Py) possèdent une constante  $\tau$  Bx (10-12) élevée par rapport aux conducteurs à graphite ou magnétite.

Ces conclusions semblent être une piste de recherche des plus prometteuses pour l'analyse des anomalies MEGATEM linéaires régionales. Il faudrait cependant qu'elles soient appuyées et confirmées par l'étude de plusieurs autres cas afin d'avoir une valeur statistique significative et de vérifier l'influence des différents dépôts de surface. Il en demeure que ces résultats pourraient être très utiles pour orienter le choix des forages et épargner des coûts en rejetant des cibles non pertinentes.

---

## 7 RÉFÉRENCES

---

- Allard, M. et Bois, D., 1999. La géophysique appliquée à l'exploration minière. Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue, Centre Collégiale de Développement de Matériel Didactique, 352p.
- Beaulieu, S.E., 2010. InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields: prepared for InterRidge, Version 2.0. World Wide Web electronic publication. <http://www.interridge.org/IRvents>.
- Bradshaw, G.D., Rowins, S.M., Peter, J. et Taylor, B.E., 2003. Genesis of the Wolverine deposit, Finlayson Lake District, Yukon: A Transitional Style of Polymetallic Massive Sulphide Mineralization in an Ancient Continental Margin Setting. The Gangue, G.A.C.-Mineral Deposit Division, Issue 79, october 2003, pp. 1-8.
- DP 2008-24, 2008. Cartes Géophysiques couleurs – 32E11 et 32E12. Par Mines d'Or Virginia INC., Noranda Exploration, Commission Géologique du Canada, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 5 p., 4 cartes.
- DP 2008-41, 2008. Levé Électromagnétique Aérien MEGATEM en Abitibi. Par Mines d'Or Virginia INC., Noranda Exploration, Commission Géologique du Canada, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 6 p., 112 cartes.
- Franklin, J.M., Gibson., H.L., Jonasson, I.R. et Galley, A.G., 2005. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, pp. 523-560.
- Galley, A.G., Hannington, M.D. et Jonasson, I.R., 2007. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits. *Dans*: Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Association Géologique du Canada, Division des Gîtes Minéraux, Publication Spéciale No. 5, pp. 3-48.
- Gibson, H.L., Allen, R.L., Riverin, G. et Lane, T.E., 2007. The VMS Model : Advances and Application to Exploration Targeting. *Dans* : Milkereit, B., ed. : Proceedings of Exploration 07 : Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.
- Goodfellow, W.D. et Zierenberg, R.A., 1999. Genesis of Massive Sulfide Deposits at Sediment-Covered Spreading Centers. *Dans* : Tucker, B.C. et Hannington, M.D., eds. : Volcanic-associated massive sulfide deposits; processes and examples in modern and ancient settings, Reviews in Economic Geology, v. 8, pp. 331-358.
- MRNF, 2009. SIGÉOM (ressource électronique), système d'information géominière à référence spatiale. Regroupement des données géoscientifiques aux échelles 1:20 000 et 1:50 000, Ministère des Ressources naturelles et de la faune Québec, Géologie Québec. [http://sigeom.mrmf.gouv.qc.ca/signet/classes/l1102\\_indexAccueil?l=f](http://sigeom.mrmf.gouv.qc.ca/signet/classes/l1102_indexAccueil?l=f)
- OGS, 2005. Integrated GIS Compilation of Geospatial Data from the Abitibi Greenstone Belt, North-eastern Ontario; Discover Abitibi Project. Commission géologique de l'Ontario, Miscellaneous Release Data, MRD 186. [http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmaccess/mndm\\_dir.asp?type=pub&id=MRD186](http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmaccess/mndm_dir.asp?type=pub&id=MRD186)
- Peter, J., Layton-Matthews, D., Piercey, S., Bradshaw, G., Paradis, S. et Boulton, A., 2007. Volcanic-Hosted Massive Sulphide Deposits of the Finlayson Lake District, Yukon. *Dans*: Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District



Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Association Géologique du Canada, Division des Gîtes Minéraux, Publication Spéciale No. 5, pp. 471-508.

Ryan, W. B. F., S.M. Carbotte, J. Coplan, S. O'Hara, A. Melkonian, R. Arko, R.A. Weissel, V. Ferrini, A. Goodwillie, F. Nitsche, J. Bonczkowski, and R. Zemsky, 2009. Global Multi-Resolution Topography (GMRT) synthesis data set, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi:10.1029/2008GC002332. Application web : geomapp.org.

Sharp, B. et Murray, D., 2002. Logistics and Processing Report Airborne Magnetic and Megatem Electromagnetic Multicoil Survey of the Ouest-Matagami and Joutel Blocks Val-d'Or, Québec on behalf of Mines d'Or Virginia Inc. Fugro Airborne Surveys, rapport interne, 85 p.

Veillette, J.J., Paradis, S.J. et Thibaudeau, P., 2003. Les cartes de formations en surface de l'Abitibi, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 1523.