MB 2018-46

Caractérisation et développement d’un protocole à multi-échelle d’intégration des données géophysiques à la modélisation géologique 3D; rapport de compilation des données récoltées durant le doctorat

Documents complémentaires

Additional Files





Licence



License

Cette première page a été ajoutée au document et ne fait pas partie du rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources naturelles
Québec



Caractérisation et développement d'un protocole à multi-échelle d'intégration des données géophysiques à la modélisation géologique 3D

Lucile Martel

MB 2018-46

Énergie et Ressources naturelles
Québec

Avertissement

Ce document est une copie fidèle du manuscrit soumis par l'auteur, sauf pour une vérification sommaire destinée à assurer une qualité convenable de diffusion.

RAPPORT DE COMPILATION DES DONNEES RECOLTEES DURANT LE DOCTORAT

Caractérisation et développement d'un protocole à multi-échelle d'intégration des données géophysiques à la modélisation géologique 3D

01 décembre 2018
Rapport préliminaire de l'étude de doctorat

Candidate : Lucile Martel
Superviseurs : Li Zhen Cheng et Réal Daigneault

Résumé

Ce rapport préliminaire représente une revue bibliographique de trois zones ciblées dans la région de Rouyn-Noranda comprenant le gisement Horne 5, le Camp Central de Noranda et l'ensemble du Groupe de Blake River. Cette revue de littérature a pour but de mieux connaître le contexte géologique du secteur visé par ce projet de recherche en modélisation 3D. Elle devrait permettre de déterminer ce qui est connu et ce qui est inconnu et d'identifier quelles informations sont essentielles à la modélisation 3D et quelles données sont manquantes. L'objectif ultime du projet est de développer une nouvelle stratégie de traitement et d'intégration des données tridimensionnelles à différentes échelles, en mettant l'accent sur la reconnaissance des structures profondes.

Dans ce rapport, les cartes d'altérations basées sur les analyses géochimiques provenant du Ministère traitées à l'aide du logiciel Lithomodeleur ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcMap. Le nombre total d'échantillons traités est d'environ 40 000 répartis de façon hétérogène dans l'ensemble de la région d'étude. Les interpolations présentées sur certaines cartes semblent peu réalistes et il sera nécessaire d'évaluer la fiabilité de ces « auréoles d'altération » pour la suite du projet.

La réalisation de modèles géologiques 3D dans la région de Rouyn-Noranda nécessite l'établissement d'une stratigraphie détaillée des diverses unités constituantes, ce que ne permet pas la relative rareté des datations radiométriques dans le secteur. L'interprétation tridimensionnelle des données géophysiques sera donc importante dans la réalisation de ce projet de recherche.

Plan du rapport

Page

I. Introduction 1

II. Synthèse bibliographique 3

II-1. Synthèse sur les SMV 5

II-2. Le Groupe de Blake River 6

2.1. Synthèse générale : géologie et géochronologie 6

2.2 Stratigraphie 8

2.3 Contexte structural 9

II-3. Le gisement Horne 5 11

3.1 Géologie du gisement 11

II-4. Connaissances théoriques en modélisation 3D géologique et géophysique 15

4-1. La modélisation géologique 3D 15

4-2. Les inversions géophysiques 17

II-5. Données disponibles et manquantes 20

III. Méthodologie envisagée 22

III-1. Réalisation de mesures géophysiques 23

1.1 Méthode utilisée 23

1.2 Mesures faites sur le terrain 24

1.3 Mesures réalisées sur les carottes de forages 26

III-2. Création de modèles tridimensionnels 26

2.1. Compilation des modèles 3D existants 27

2.2. Définition des éléments clés dans un modèle propre à son échelle 27

2.3. Outils de modélisation 3D et objectifs associés 28

2.4. Développement d'outils de modélisation assistée 31

III-3. Caractérisation des facteurs significatifs pour l'exploration minière 32

3.1. Compilation des modèles du potentiel faits par MERNQ 32

3.2. Caractérisation des unités géologiques et des zones d'altération 32

3.3. Intégration des résultats 2D (cartes de potentiel et résultats de Lithomodeleur) avec les modèles 3D 40

3.4. Évaluation de la résolution spatiale des levés géophysiques par modélisation directe et inverse 40

3.5. Développement d'un protocole de modélisation 3D 41

IV. Conclusion 41

Bibliographie 44

Liste des figures et tableau

Figure 1 : Localisation des différentes zones d'études d'après (McNicoll, et al. 2014) et modifié de la carte interactive du MERNQ (édition 2012) 4
Figure 2 : Diagramme schématique d'un dépôt de sulfures sur la dorsale médio-atlantique. Ceci représente une coupe transversale classique d'un gisement de SMV, avec des lentilles de sulfures concordantes semi-massives à massives reposant sur un système de veines de stockwerk discordant et un halo d'altération associé, ou "pipe". D'après (Hannington et al. 1998) 6
Figure 3 : Localisation du Groupe de Blake River dans la Sous-province de l'Abitibi. D'après (Pearson et Daigneault 2009). DPMFZ : Zone de faille de Destor-Porcupine Manneville. CLLFZ : Zone de faille de Cadillac Larder Lake 7
Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Groupe de Blake River avec les 9 différentes formations et la localisation des gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV). D'après (Sarane Sterckx et Goutier 2013) 8
Figure 5 : Reconstruction volcanostratigraphique de la séquence de la mine Horne, basée sur la géologie du niveau 975. D'après (Kerr et Gibson 1993) 12
Figure 6 : Coupe vertical nord-sud de la mine Horne et des lentilles de sulfure massif H supérieur (UH) et H inférieur (LH). D'après (Kerr et Gibson 1993) 13
Figure 7 : Reconstruction de la vue en plan et en coupe du paléo-graben de Horne. D'après (Kerr et Mason 1990) 15
Figure 8 : Méthode des champs de potentiels. À partir des données d'entrée (a), le logiciel va calculer les différentes courbes d'isovaleurs (b). Les limites de formation étant les courbes d'isovaleurs qui passent par les points de contact. D'après (Calcagno, et al. 2008) 16
Figure 9 : Méthode DSI - Interpolation d'une surface comme étant constituée de multiples triangles d'après (Le Melinaire 1992) 17
Figure 10 : Illustration du principe non unicité. Sur la figure, les 3 anomalies en profondeur créent la même réponse géophysique d'après Dubois, Diament, & Cogné, 2010 18
Figure 11 : Illustration du « forward problem » (à gauche) et du « inverse problem » (à droite) d'après (Oldenburg et Li 2005) 19
Figure 12 : Cartes de Rouyn Noranda indiquant la localisation des forages utilisés (en haut) pour une grille carrée de 200 m (en bas) pour une grille carrée de 100 m 21
Figure 13 : Carte de localisation des différents points de mesures réalisés lors de la campagne gravimétrique 22
Figure 14 : Valeurs de susceptibilité mesurée sur le terrain suivant les affleurements. (En haut) Tableau des valeurs. (Au centre) Carte de localisation des affleurements. (En bas) Correspondance avec la lithologie 25
Figure 15 : Modèle numérique d'altitude (MNA) en 3 dimensions de la propriété élargie de Horne 5, réalisé avec le logiciel GeoModeller 3D 27
Figure 16 : Illustration du principe d'inversion géophysique. A droite, la carte d'anomalie en données d'entrées. A gauche, le modèle 3D calculé pour correspondre à la donnée d'entrée 29
Figure 17 : Implantation de l'ensemble des forages disponible pour la zone autour du gisement Horne 5 sous GeoModeller 3D 31
Figure 18 : Zone d'altération autour d'un VMS 34

Figure 19 : Diagramme de Plot modifié. L'ensemble des points bleus représente les échantillons analysés 36
Figure 20 : Carte de l'emplacement des échantillons analysés disponibles..... 37
Figure 21 : Carte des échantillons altérés d'après le graphique de la figure 2..... 38
Figure 22 : Carte d'altération. A et B : à partir de l'indice Saturation Séricite. C et D : à partir de l'indice Séricite 39

Tableau 1 : Synthèse des lithologies présentes au sein de chaque formation..... 10

I. Introduction

L'acquisition de connaissances du milieu géologique sur lequel nous vivons reste un enjeu d'actualité qui permet de comprendre les mécanismes de formation de la Terre ancienne, surtout dans le cas de la période archéenne, mais aussi de caractériser et de comprendre la formation des gisements métallifères pouvant s'y trouver. Pour cela, plusieurs outils ou moyens peuvent être utilisés par les géologues suivant l'échelle étudiée. À l'échelle régionale, il s'agira principalement de cartographies de terrain, de réalisations de coupes géologiques, de levés géophysiques, d'analyses structurales ou de forages à grande profondeur. À l'échelle locale, pourront être ajoutés d'autres outils, tels que des relevés géochimiques des sols et des forages à faible profondeur par exemple. À l'échelle de la roche, les outils seront différents avec l'étude de la minéralogie, de la microstructurale et des mesures de propriétés physiques *in situ*. Toutefois, toutes ces connaissances sont dérivées de données provenant essentiellement de la surface ou proche d'elle dans le cas de données de forages. En dépit de l'amélioration des méthodes de traitement et d'interprétation de ces données de surface, la plus grande lacune demeure la compréhension de la 3^{e} dimension. C'est pour palier à cette problématique que les représentations tridimensionnelles (modèles 3D) se sont développées à la fin des années 1980 et au courant des années 1990 (Le Melinaire 1992, Turner 1992, Mallet 1992, Lajaunie, Courrioux et Manuel 1997) à travers le biais de logiciels informatiques tels que Surpac (1982), Gocad (1990), GeoModeler3D (2002), Geotic (2002), etc.

Une meilleure représentation de la 3^{e} dimension permet d'émettre des hypothèses concernant la géométrie des unités lithologiques et leurs relations entre elles, et ainsi de créer des modèles plus réalistes aux vues des données disponibles. La réalisation d'un modèle géologique 3D repose sur une méthodologie basique commune et connue associant les données de cartographies de terrain, les coupes géologiques et les forages (Jessel 2001, Lachance, et al. 2004, Bédard 2006, McGaughey et Milkereit 2007). Cependant, il est nécessaire de construire son modèle en fonction d'une problématique précise. En effet pour un même jeu de données initiales, une infinité de modèles 3D peuvent être conçus, c'est pourquoi la méthodologie de base doit être affinée en fonction du contexte et la problématique associée (Jessel 2001, Martelet, et al. 2004, Kaufmann et Martin 2008). La modélisation 3D est aussi utile et utilisée pour la partie exploration des ressources naturelles, telles que le pétrole (Kaufmann et Martin 2008, Ringrose, Martinius et Alvestad 2008) ou les ressources minières (Cowan, et al. 2003, Fallara, Legault et Rabeau 2006, Rabeau, Legault et Cheng, et al. 2006) en permettant une

meilleure visualisation des gisements connus ce qui permet de progresser sur la compréhension de la mise en place de ces gisements et ainsi, par extension, trouver des nouvelles zones de prospection (Luo, et al. 2007).

Cependant, la modélisation géologique 3D, telle qu'exposée ci-dessus, repose sur l'extrapolation de données ponctuelles de surface ou subsurface et non sur des données continues dans l'espace. Pour pallier cette lacune, une des solutions possibles repose sur la géophysique et les méthodes associées (magnétisme et gravimétrie principalement). Les algorithmes d'inversion géophysique procurent aujourd'hui une visualisation continue en profondeur, ce qui est un atout majeur de la modélisation géologique 3D (Apel 2005). À partir de ces nouvelles données, il est alors possible de réaliser, soit une modélisation 2D (Oldenburg 1974, Ellis et Oldenburg 1994, Portniaguine et Zhdanov 1999) ou une modélisation 3D (Shamsipour, Marcotte, et al. 2010, Astic 2012, Chouteau et Shamsipour 2015). Que ce soit pour la 2D ou la 3D, le processus de modélisation consiste à entrer dans le logiciel de modélisation des données relevées sur le terrain, le logiciel va alors calculer une géométrie possible des structures (Oldenburg et Li 2005, Oldenburg et Pratt 2007). L'objectif est d'obtenir une similitude entre les données en surface mesurées sur le terrain et celles calculées par le logiciel. Bien entendu, une modélisation 3D demandera une capacité de calcul beaucoup plus importante qu'une modélisation 2D (puisque le volume devra être pris en compte contrairement à la 2D), mais sera également plus intéressante pour ce qui sera le résultat obtenu. À l'ère de la numérisation, la puissance de calcul est en perpétuelle augmentation, ce qui a permis de développer de plus en plus la modélisation géophysique 3D au détriment de la modélisation 2D, peu utilisée à l'heure actuelle. De nombreuses études (Fullagar et Pears 2007, Guillen, et al. 2008, Shamsipour 2010, Astic 2012) ont permis de montrer l'apport non négligeable qu'apporte la modélisation géophysique 3D et, par extension, l'inversion géophysique 3D, aussi bien dans le domaine de la structurale que dans celui minier ou du pétrole, par exemple.

Néanmoins, peu d'études font actuellement l'association entre la modélisation géologique 3D et la modélisation géophysique 3D. Pourtant d'après les études de Martelet et al. (2004), Fullagar et Pears (2007) et Wang, Zhu et al. (2012), le couplage entre les deux modèles permet d'apporter une nouvelle vision aux données et de proposer de nouvelles hypothèses. De plus, dans le domaine minier, cela rajoute des données permettant d'améliorer la recherche de nouvelles zones de prospection (Wang, et al. 2012). Cependant, ces études associent modélisation géologique et géophysique que pour une échelle donnée, parce que plus la quantité d'information connue est importante, mieux le modèle est. Les changements d'échelle

impliquent une généralisation ou une simplification des données. Toutefois, le degré de généralisation ou de regroupement de données de départ implique des choix qui seront faits en fonction des représentations souhaitées. Le défi pour cette thèse est de développer une nouvelle stratégie de traitement et d'intégration d'informations tridimensionnelles à travers différentes échelles, mettant l'accent sur la reconnaissance de structures profondes. Une étude systématique sur la contribution du couplage entre la modélisation 3D géologique et géophysique à différentes échelles est fondamentale dans ce nouveau développement. Pour illustrer nos propos, nous avons fait le choix de nous orienter dans le domaine minier, à trois échelles différentes : 1) à l'échelle du gisement, 2) celle de la propriété minière, puis 3) à l'échelle régionale.

Dans cet optique de recherche, les objectifs suivants ont été définis. Tout d'abord de 1) produire et valider des modèles d'inversion sur trois échelles distinctes : a) régionale, b) sectorielle et c) locale, 2) établir la méthodologie d'intégration avec les règles de sélection et de généralisation des données géologiques permettant l'ajustement du modèle d'inversion selon l'échelle et 3) valider et interpréter les résultats des modélisations et déduire les implications en termes de processus et d'impacts pour l'exploration. L'objectif principal et global étant de développer un protocole innovateur de modélisation 3D à travers différentes échelles permettant la détermination de nouvelles zones de prospection.

II. Synthèse bibliographique

La sous-province de l'Abitibi d'âge archéen est une région favorable à la mise en place de gisements métalliques. Il s'agit principalement de gisements riches en or et en métaux de base (cuivre, zinc), concentrés au niveau des grandes structures archéennes, telles que la Faille de Cadillac Larder Lake. Nous résumerons d'abord les caractéristiques principales de la sous-province, ainsi que les trois zones ciblées par cette étude, dont le gisement Horne 5, le Camp Central de Noranda et l'ensemble du Groupe de Blake River (Figure 1). L'objectif de cette revue de littératures est de mieux connaître le contexte géologique dans lequel le développement se réalise ; de comprendre ce qui est connu et ce qui est inconnu ; de réfléchir sur quelles informations sont essentielles pour la modélisation 3D et lesquelles sont manquantes. Parallèlement à la compilation des informations géologiques, des méthodes de modélisation 3D, en particulier l'inversion des données géophysiques, ont également fait une lecture préliminaire. Dans l'état présent, la synthèse bibliographique permet simplement une compilation d'information géologique.

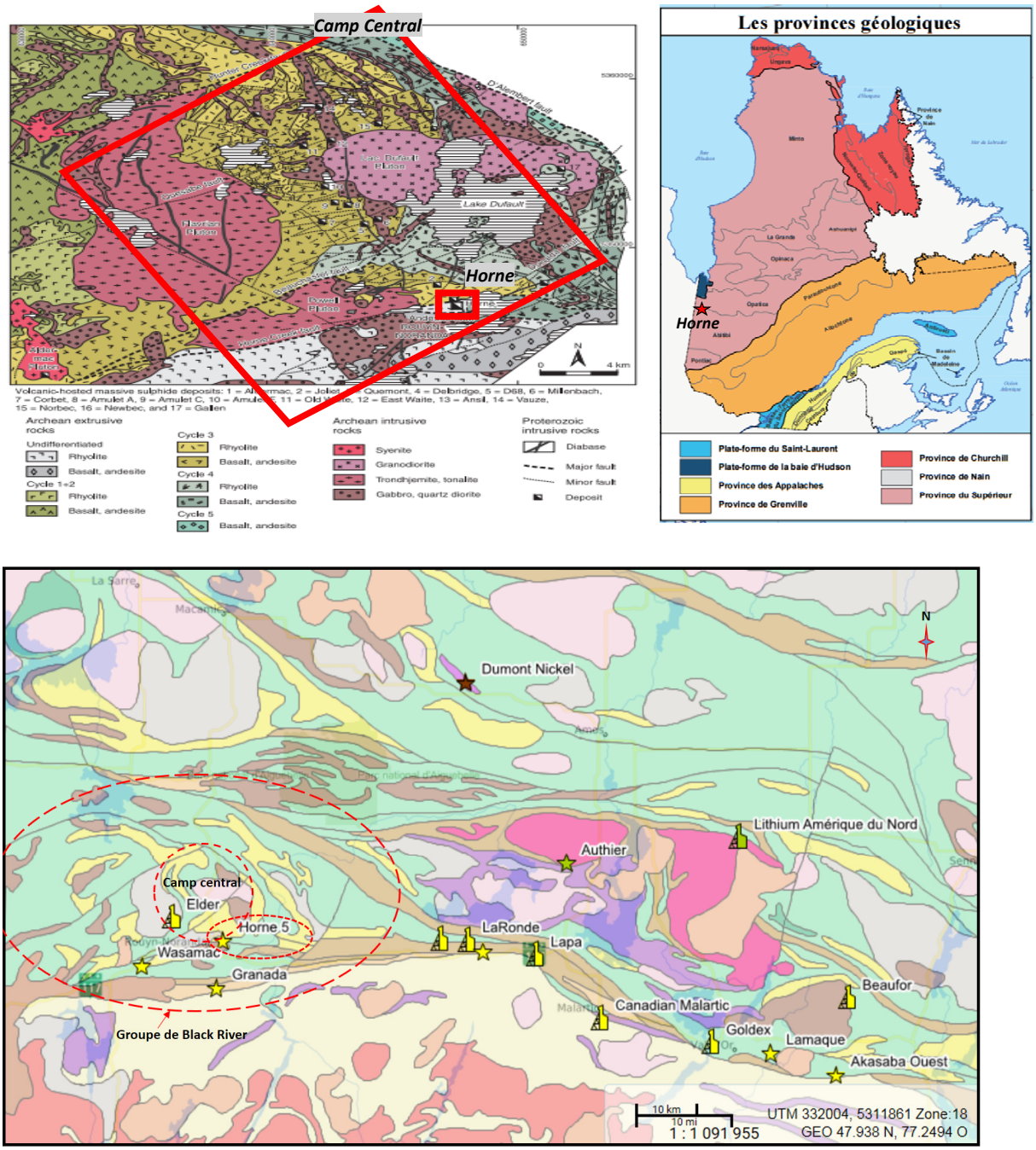


Figure 1 : Localisation des différentes zones d'études d'après (McNicoll, et al. 2014) et modifié de la carte interactive du MERNQ (édition 2012)

II-1. Synthèse sur les SMV

Les Sulfures Massifs Volcanogènes (SMV) représentent des minéralisations typiques de la ceinture de roches vertes d'Abitibi et, plus particulièrement, du Groupe de Blake River dans la portion sud de la sous-province. Les SMV sont des gisements sous-marins qui se forment au niveau ou à proximité du plancher océanique. Ils se présentent sous la forme de lentilles de sulfures massifs encaissés dans des roches sédimentaires ou volcaniques. Les dépôts sont générés à partir de fluides hydrothermaux enrichis en métaux, faisant d'eux des sources majeures de Zn, Cu, Pb, Ag et Au, et des sources significatives de Co, Sn, Se, Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga et Ge (Galley et al. 2007, Gibson et al. 2007). Du côté structural, les SMV sont généralement composés d'une lentille massive située au-dessus d'un système de *stockwerk* et de sulfures disséminés (Figure 2). Ils peuvent être classés selon quatre catégories principales en fonction de leur encaissant majeur : mafique – bimodal mafique – bimodal felsique – felsique. Ces catégories sont aussi révélatrices du milieu de dépôt et, plus particulièrement, de la profondeur et du contexte de mise en place des dépôts. Cependant, tous resteront former dans un contexte d'extension océanique, il s'agit là d'une des caractéristiques principales des SMV (Galley et al. 2007, Gibson et al. 2007). La majorité des gisements de type SMV se situent au sein de grands ensembles composés de plusieurs gisements appelés « camps miniers ». Ces derniers sont généralement localisés dans des environnements interprétés communément comme une caldera ou un rift qui sont des zones préférentielles d'amincissement de la croûte, de dépressurisation du manteau sous-jacent et de génération de magmas (Galley et al. 2007).

Le passage de fluides chauds au sein des roches sous-jacentes entrainera la formation de différentes zones d'altération. Ces dernières peuvent être de différentes natures. organisées de manière relativement concentrique autour du dépôt de sulfure massif. Tout d'abord. en partant de la zone de dépôt, une altération à quartz-chlorite peut être observée avec parfois une présence importante de magnétite, vient ensuite une zone à chlorite-séricite et, pour finir, une zone à séricite-phengite. (Galley et al. 2007, Gibson et al. 2007). Une altération pyriteuse et une autre argileuse peuvent parfois aussi être observées suivant la composition de l'encaissant et la température du fluide hydrothermal. Ces différentes zones d'altération peuvent atteindre une épaisseur cumulée pouvant aller jusqu'à 2000 ou 3000 m. À la suite d'un métamorphisme régional ou de contact, ces zones altérées sont sensibles au développement de minéraux métamorphiques comme de phlogopite, la cordiérite, muscovite et autres (Figure 2).

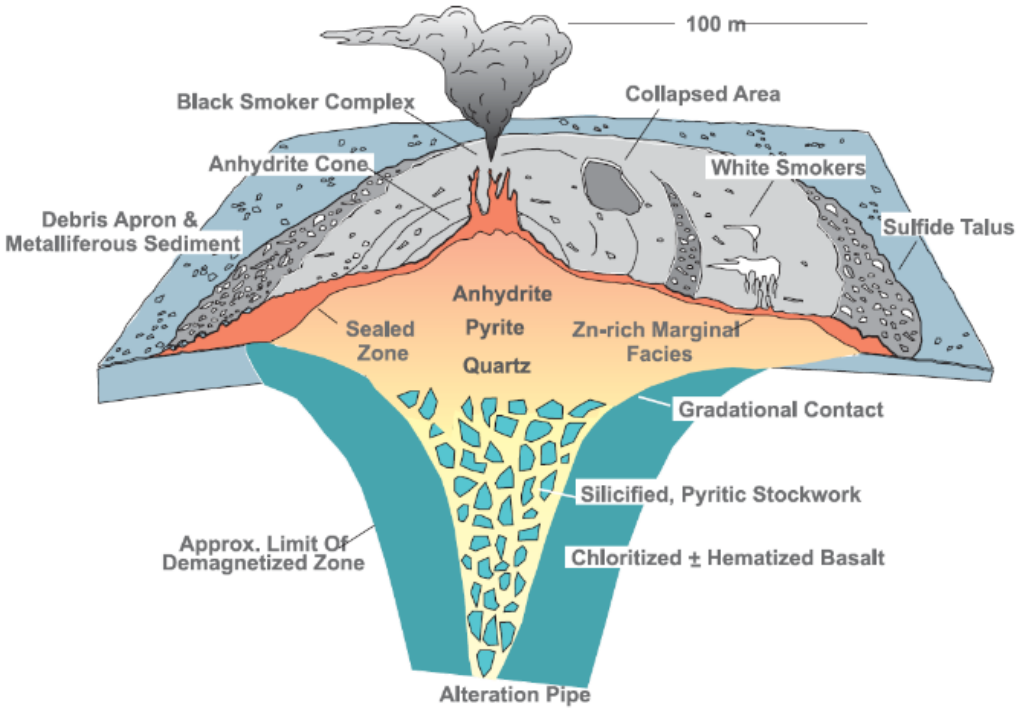


Figure 2 : Diagramme schématique d'un dépôt de sulfures sur la dorsale médio-atlantique. Ceci représente une coupe transversale classique d'un gisement de SMV, avec des lentilles de sulfures concordantes semi-massives à massives reposant sur un système de veines de *stockwerk* discordant et un halo d'altération associé, ou "pipe". D'après (Hannington et al. 1998)

En résumé, bien que le processus général soit relativement similaire pour l'ensemble des SMV, chacun a des caractéristiques particulières dues à son encaissant ou son évolution géologique. Cependant, il est important de noter la présence de camps miniers composés d'une multitude de SMV, ceux-ci provenant alors d'un contexte et d'une histoire géologique identique. Ainsi, l'amélioration de la compréhension et de la visualisation d'un seul de ces SMV peut conduire à la découverte d'autres dépôts similaires au sein du camp.

II-2. Le Groupe de Blake River

2.1. Synthèse générale : géologie et géochronologie

Le Groupe de Blake River fait partie de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi d'âge archéen. Il s'étend entre la Faille de Destor Porcupine au nord, la Faille de Cadillac au sud et la Faille de Parfouru à l'est avec une superficie totale d'environ 3000 km² (Figure 3). Il est caractérisé par une séquence volcanique de 4 à 7 km d'épaisseur composée de roches volcaniques mafiques et felsiques (Baragar 1968, Jolly 1980, Dimroth et al. 1982, Hannington et al. 2003). D'abord

identifié comme un assemblage de plaines volcaniques, il a été aussi interprété comme un complexe subaquatique composé de trois calderas emboitées et faisant ainsi du Blake River une mégacaldera (Pearson et Daigneault 2009). Cette interprétation repose sur la distribution des dykes présents dans le Blake River qui montrent une organisation radiale et concentrique, ainsi que sur les réseaux de failles et la distribution des roches volcaniques présentes et la prise en compte de la géométrie des couches formant un dôme central. Ainsi, trois calderas superposées ont été interprétées : la caldera de Misema, de New Senator et celle de Noranda qui était reconnue depuis les travaux de Gibson et Watkinson (1990) au sein du Blake River (Pearson et Daigneault 2009). Lors des premières études réalisées sur le Blake River, la présence de deux sous-groupes de compositions différentes a pu être établie : le sous-groupe de Misema et celui de Noranda (Goodwin 1977). Le sous-groupe de Misema représente la base du Blake River et est dominé par des roches mafiques tholéiitiques à calco alcaline avec des édifices felsiques disséminés (Gélinas, Brooks, et al. 1977, Ayer, et al. 2005). Le sous-groupe de Noranda se différencie, quant à lui, par son caractère bimodal dominé par des roches mafiques tholéiitiques à calco alcalines et des roches felsiques, représentant 40 % du volume de ce sous-groupe (Gélinas, Brooks, et al. 1977, Gélinas, Trudel et Hubert 1984).

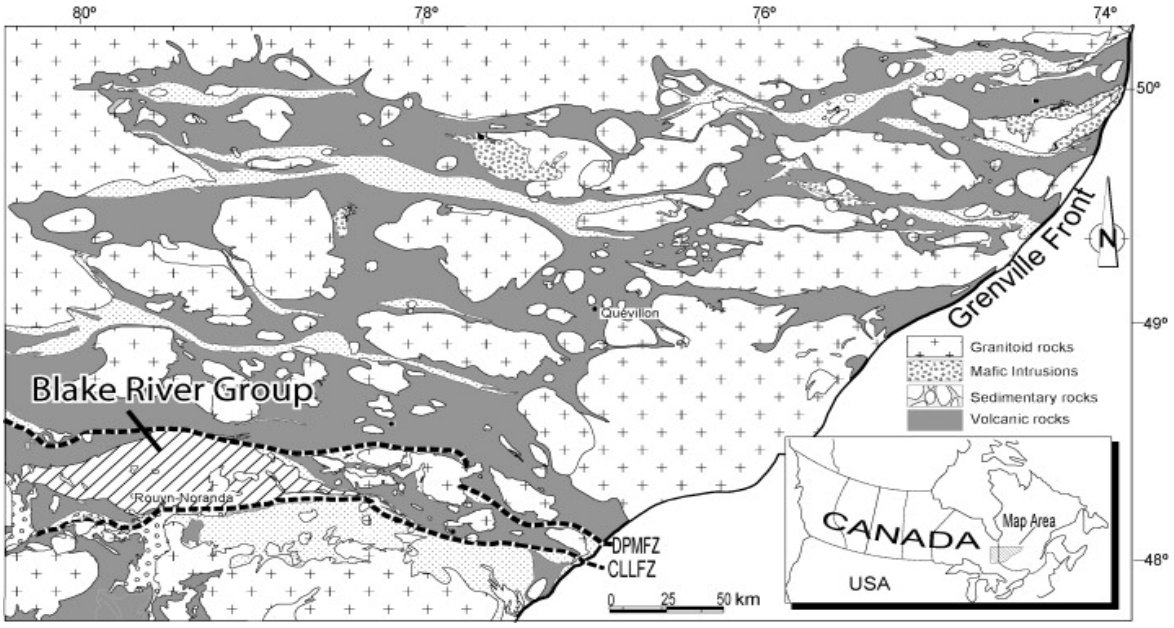


Figure 3 : Localisation du Groupe de Blake River dans la Sous-province de l'Abitibi. D'après (Pearson et Daigneault 2009). DPMFZ : Zone de faille de Destor-Porcupine Manneville. CLLFZ : Zone de faille de Cadillac Larder Lake

2.2 Stratigraphie

Plusieurs études ont permis de proposer une séquence stratigraphique dans certains secteurs du Blake River. À l'automne 2012, un projet de l'IRNS-ETE, avec le soutien du MERN, a vu le jour ayant comme objectif d'utiliser la géochimie afin de caractériser l'ensemble des formations présentes dans le Blake River (Sarane Sterckx et Goutier 2013). Au cours de ce projet, une nouvelle carte géologique a été réalisée mettant en avant neuf formations distinctes : Reneault-Dufresnoy, Noranda, Carnac, Bousquet, Duprat-Montbray, Rouyn-Pelletier, Hébécourt, Dupuis et Horne (Figure 4). La lithologie, avec ou sans stratigraphie, a été étudiée en détail pour la plupart de ces formations (excepté les formations de Carnac, Dupuis et Rouyn-Pelletier). L'ensemble des lithologies composant les différentes formations a été synthétisé dans le tableau 1.

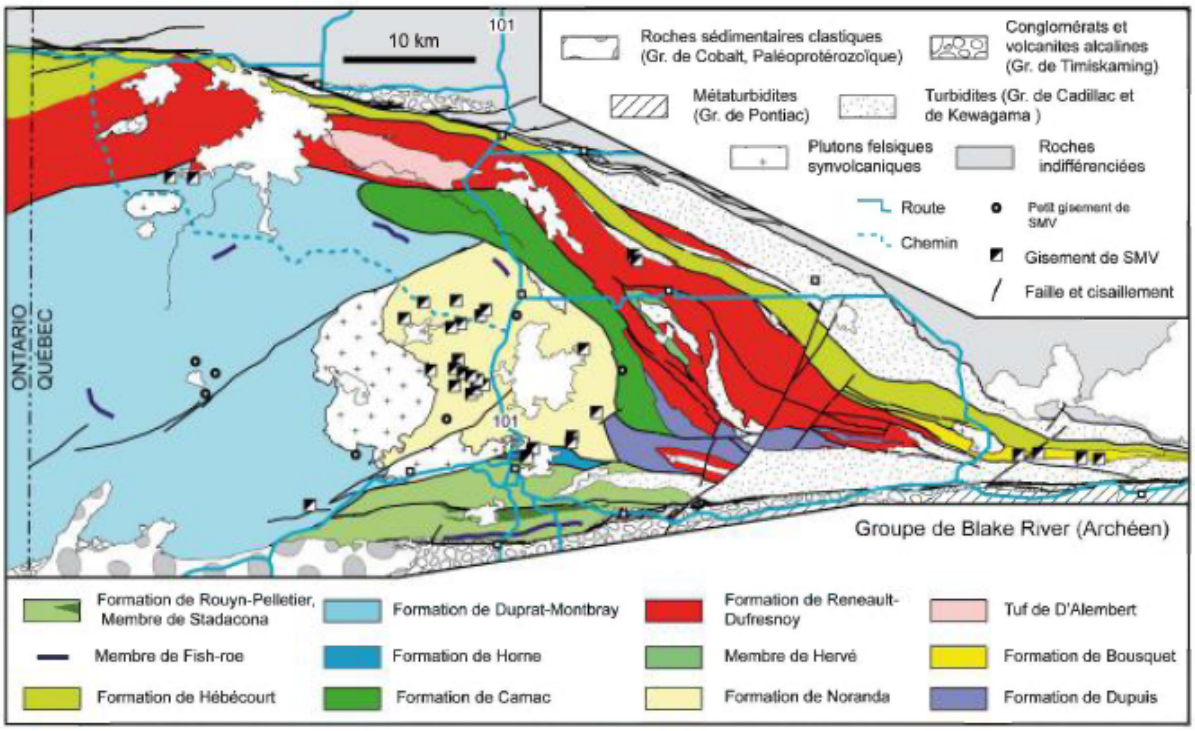


Figure 4 : Carte géologique simplifiée du Groupe de Blake River avec les 9 différentes formations et la localisation des gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV). D'après (Sarane Sterckx et Goutier 2013)

2.3 Contexte structural

Pour la partie structurale, la Formation de Bousquet, tout comme celle d'Hébécourt, a subi une importante déformation régionale causant le plissement régional observable sur l'ensemble du Blake River. La schistosité principale (Sp) est orientée est-ouest à fort pendage est bien observable et indique une déformation due à un raccourcissement horizontal nord-sud accompagné d'une extension subverticale (Marquis, et al. 1990, Savoie, et al. 1991, Tourigny, Doucet et Bourget 1993). Une troisième phase de raccourcissement, appelée déformation secondaire, est également visible et a mené à la formation de failles conjuguées subverticales nord-ouest sud-est (dextre) et nord-est sud-ouest (senestre), ce qui indique une nouvelle compression nord sud (Mercier-Langevin, Dubé, et al. 2007). À cela vient s'ajouter deux épisodes de métamorphisme : tout d'abord un épisode prograde au faciès supérieur des schistes verts / inférieur des amphibolites associées, puis un épisode rétrograde au faciès des schistes verts (Dimroth, Imreh et Goulet, et al. 1983, Tourigny, Hubert, et al. 1989, Marquis, et al. 1990, Powell, Carmichael et Hodgson 1995, Lafrance, Moorhead et Davis 2003, Mercier-Langevin, Dubé, et al. 2003).

Formation d'Hébécourt	**Formation de Bousquet**			**Formation Duprat-Montbray**		**Formation de Reneault-Dufresnoy**	**Formation de Noranda**	**Formation de Horne**	
Roches mafiques tholéiitiques (basalte et dykes de gabbro)	Membre Supérieur	Unité felsique supérieur ***(5.5)***	Roches volcaniques rhyodacitiques à rhyolitiques avec dépôts autoclastiques	Complexe Volcanique de Flavrian-Ouest (CVFO)	Volcanites non différenciées (VND)	Andésite basaltique ***(RD-10)***	Andésite, Rhyolite (Cycle IV)	Formation Remnor	Rhyolite (coulée)
		L'andésite basaltique ***(5.4)***	Complexe massif de dykes et de filons-couche à faciès feldspathique-porphyrique majeur		Unité des rhyolites	Rhyolite ***(RD-9)***	Andésite, Rhyolite (Séquence centrale des Mines - Cycle III)	Main Mine	Rhyolite (brèche et coulée)
		La rhyolite feldspathique et quartz-phyrique ***(5.3)***	3 faciès volcaniques : massif (faciès dominant), autoclastique ou tufacé		Unité des dacites	Dacite, rhyodacite, rhyolite ***(RD-8)***		Ouest 3919	Rhyolite (brèche et coulée), Dacite
		La rhyodacite-rhyolite ***(5.2b)***	Rhyodacite volcanoclastique (brèche d'écoulement) et rhyolite massive à bréchique		Unité des rhyodacites	Rhyolite à phénocristaux ***(RD-7)***			
		La dacite-rhyodacite ***(5.1b)***	Dacite, Rhyodacite - ***5.1b-(d)***	Andésite III		Dacite, rhyodacite, rhyolite ***(RD-6)***			
			Dykes mafiques à intermédiaires - ***5.1b-(c)***	Andésite IIa		Andésite-dacite ***(RD-5)***			
			Dépôts massifs à intermédiaires - ***5.1b-(b)***	Andésite I		Andésite ***(RD-4)***			
			Dykes mafiques à intermédiaires - ***5.1b-(a)***			Basalte et andésite basaltique ***(RD-3)***			
	Membre inférieur	Unité hétérogène de Bousquet ***(4.4)***	Coulées basaltiques et andésitiques fortement altérées			Andésite basaltique ***(RD-2)***			
		Tufs scoriacés de Bousquet ***(3.3)***	Blocs andésitiques et tholéiitiques			Basalte et andésite basaltique ***(RD-1)***			
		Unité volcanoclastique de Sphynx ***(3.2)***	Basalte feldspathique et / ou andésite						
		Filons-couches felsiques de Bousquet ***(2.2)***							

Tableau 1 : Synthèse des lithologies présentes au sein de chaque formation

II-3. Le gisement Horne 5

3.1 Géologie du gisement

Le gisement de sulfures massifs volcanogènes (SMV) de Horne est situé dans le Groupe de Blake River dans la partie sud de la sous-province de l'Abitibi. De manière plus précise, ce dernier est localisé dans la séquence géologique de la Formation de Horne, au sud du camp central de Noranda, encastré entre les failles de Horne Creek et d'Andésite. Sa découverte remonte au début des années 1900 lors des premières explorations minières en Abitibi. Le gisement a été mis au jour par Edmond Horne et a, depuis sa mise en exploration en 1924 et jusqu'à sa fermeture en 1976, produit 260 t d'or et 1.13 Mt de cuivre, ce qui ramène aux prix actuel du marché des métaux représenterait 5,2 milliards de dollars US.

Pour la partie géologique, il s'agit d'un gisement syngénétique qui s'inclue dans le complexe volcanique archéen du Blake River composé de plusieurs séquences de roches volcaniques. Comme cité précédemment, ce complexe a connu au cours de son histoire, plusieurs épisodes volcaniques ayant entrainé la formation de différents centres volcaniques de tailles inférieures. Le complexe volcanique de Noranda (CVN), dernier complexe mis en place dans la caldera New Senator, est subdivisé en cinq cycles (de I à V) constitués chacun d'une unité inférieure d'affinité andésitique ou basaltique et d'une unité supérieure bimodale d'affinité andésitique ou basaltique et rhyolitique (de Rosen-Spence 1976, Gibson 1989). Les roches issues du cycle III sont nommées Séquence des Mines et héberge la majorité des dépôts de SMV présents dans le CVN (Gibson et Watkinson 1990). Cette dernière aurait été mise en place lors d'un épisode de subsidence du CVN amenant à la formation du « Chaudron de Noranda ». Du côté structural, le chaudron est limité au nord par la faille de Hunter Creek, au sud par la faille de Horne Creek, à l'est par la faille de D'Alembert et à l'ouest par la marge Ouest du Pluton de Flavrian (Lichtblau 1989, Dimroth et al. 1982, Gibson et Watkinson 1990). Ainsi, le gisement Horne ne fait pas partie intégrante du chaudron de Noranda, mais il se situe plus au sud puisque la Formation de Horne, séquence hôte du gisement, est comprise entre les failles de Horne Creek au nord et d'andésite au sud. Malheureusement, un manque de données géochronologiques et de compréhension géologique rend difficile la corrélation entre la Formation de Horne et la Séquence des Mines (ou tout autre formation située au nord de la faille de Horne Creek) (Kerr et Gibson 1993, Gibson, Kerr et Cattalani 2000). Les épisodes de subsidences se sont poursuivis le long de la faille de Horne Creek durant le cycle IV du CVN, ce qui pourrait se révéler majeur dans la compréhension de la mise en place du gisement Horne.

La Formation de Horne est une séquence volcanique d'environ 900 m à dominance rhyolitique orientée vers le nord à pendage subvertical. Elle est constituée de coulées de laves rhyolitiques, de brèches autoclastiques et de roches volcanoclastiques (Kerr et Mason 1990, Kerr et Gibson 1993, Gibson, Kerr et Cattalani 2000). Elle peut être subdivisée en trois formations distinctes informelles : Ouest 3919, Main Mine et Remnor (Figure 5) (Kerr et Gibson 1993).

Les minéralisations de sulfure se présentent sous formes massives à disséminées au sein de plusieurs corps minéralisés (H supérieur, H inférieur, Zone G et Zone n°5). Les plus importants en termes de teneur sont les corps H supérieur et inférieur qui se localisent au sommet de la formation Main Mine (Figure 5) (Gibson, Kerr et Cattalani 2000). Ils sont composés de pyrite et de pyrrhotine avec de faibles quantités de chalcopyrite, de magnétite, et localement de la sphalérite (Price 1933). Ils proviennent de deux épisodes de formation différents bien que tous deux soient en contexte d'hydrothermalisme sous-marin. Le H supérieur s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 395 m, et le H inférieur de 365 m de profondeur jusqu'à 945 m (Figure 6). Le corps minéralisé Zone n°5 recouvre, quant à lui, le corps H inférieur et se poursuit jusqu'à 2650 m de profondeur. Les teneurs y sont plus pauvres que dans les autres corps, mais son volume est supérieur (Gibson, Kerr et Cattalani 2000).

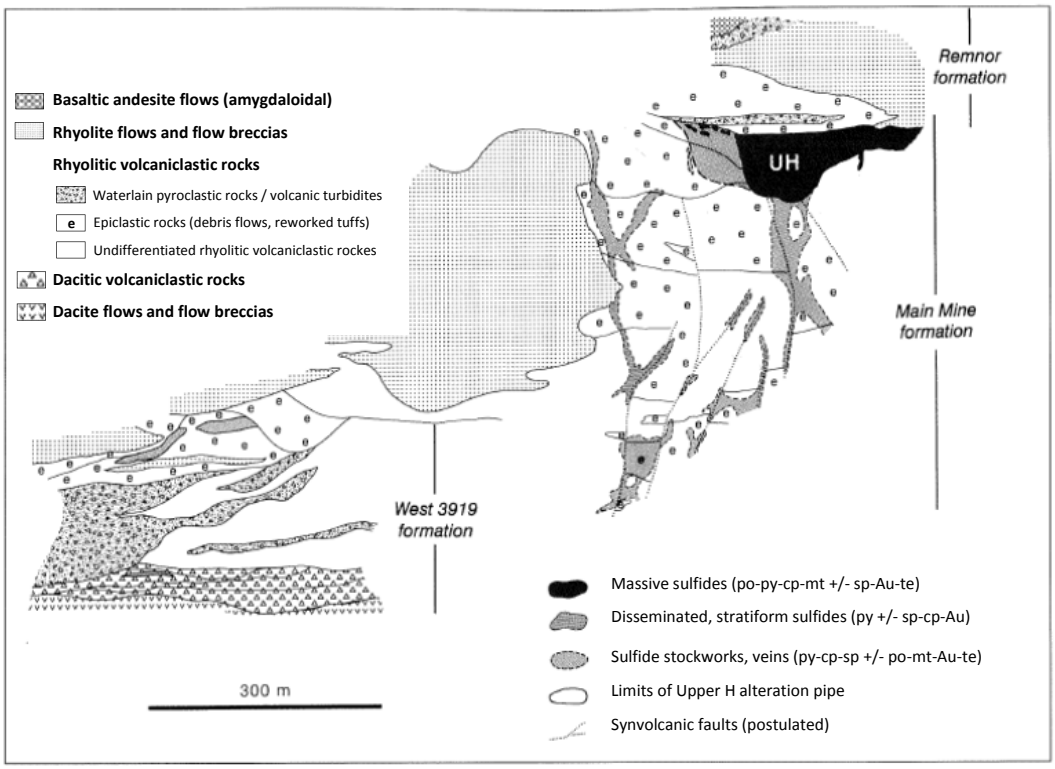


Figure 5 : Reconstruction volcanostratigraphique de la séquence de la mine Horne, basée sur la géologie du niveau 975. D'après Kerr et Gibson (1993)

Pour le côté structural, de nombreuses failles sont présentes, dont une famille orientée nord-est qui recoupent le corps H supérieur. Quatre suites de roches intrusives viennent également recouper les corps minéralisés de sulfure. Elles sont constituées de cryptodomes porphyriques, de dykes dioritiques, de dykes de syénites à quartz et de dyke de diabases (Gibson, Kerr et Cattalani 2000). Concernant l'altération présente, celle-ci est essentiellement de nature hydrothermale et affecte presque toutes les roches présentes dans la séquence de Horne. Les minéraux d'altération dominants sont le quartz, la séricite et la chlorite. Deux types d'altération hydrothermale peuvent être observés (MacLean et Hoy 1991) : 1) altération de quartz-séricite omniprésente et 2) chloritisation localisée et discordante.

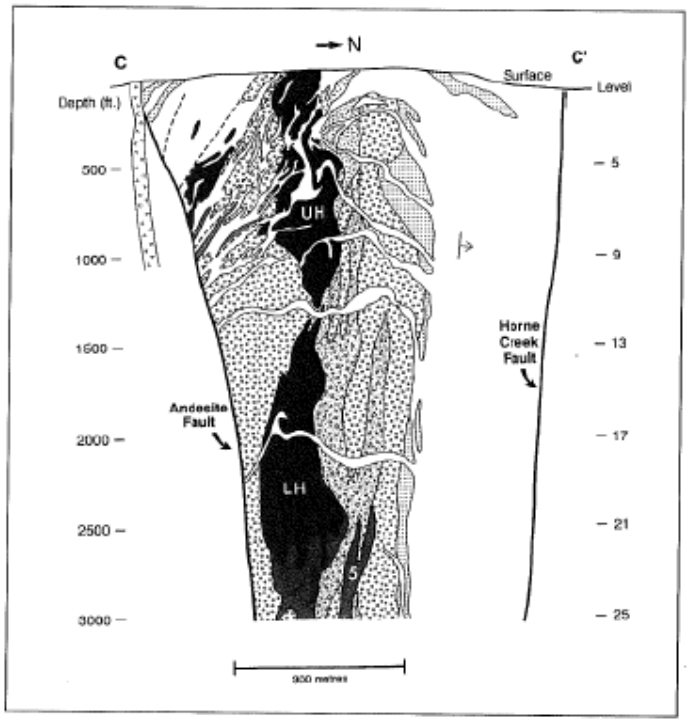


Figure 6 : Coupe vertical nord-sud de la mine Horne et des lentilles de sulfure massif H supérieur (UH) et H inférieur (LH). D'après (Kerr et Gibson 1993)

Concernant la mise en place et la formation du gisement de Horne, les premiers modèles datant des années 1920-1930 suggéraient un remplacement hydrothermal épigénétique contrôlé par des failles dans des roches hôtes favorables, telles les rhyolites (Price 1933, Suffel 1935, Price 1948). Cette théorie de mise en place épigénétique a fortement influencé la recherche sur les SMV durant les 40 années qui ont suivies. La compréhension de la formation des SMV a évolué radicalement vers la fin des années 1960. Plusieurs études (Gilmore 1965, Roscoe 1965) ont suggéré que les dépôts de SMV provenaient en fait de dépôts de « fumées » formées en même

temps que les roches hôtes. Cette théorie impliquait un caractère volcanogène et donc syngénétique au SMV (contrairement à la théorie précédente) et ne fut reconnue qu'après de longues années de débats. Pour le gisement Horne, cette nouvelle théorie est venue ébranlée l'interprétation épigénétique présentée dans les années 1950 qui s'appuyait, notamment sur des observations pétrographiques et géologiques, avec la présence d'une discordance entre les corps H supérieur et inférieur et la roche hôte. Ainsi, dans les années 1970, la formation du gisement a été reconsidérée par différents chercheurs (Mookherjee et Suffel 1968, Darling et Suffel 1969, Sinclair 1970, Sinclair 1971, Fisher 1970). Leurs résultats indiquaient alors un modèle génétique en deux temps. Tout d'abord, un épisode de minéralisation syngénétique avec la formation de la Zone n°5, puis un épisode épigénétique qui serait venu enrichir les sulfures massifs, notamment en or. Il faudra cependant attendre le début des années 1990 pour que des chercheurs présentent une série de preuves variées (observations de terrains, pétrologie, géochronologie, etc.) indiquant le caractère syngénétique des minéralisations cuprifères et aurifères du gisement Horne (Kerr et Mason 1990, Barrett, Cattalani et MacLean 1991, Cattalani, et al. 1993, Kerr et Gibson 1993).

Ainsi, d'après les résultats de ces dernières études, les corps minéralisés présents dans le gisement de Horne se seraient formés dans un contexte de paléo-graben (chaudron de Noranda) en marge d'un édifice rhyolitique sous-marin (Figure 7) (Kerr et Mason 1990, Barrett, Cattalani et MacLean 1991, Cattalani, et al. 1993, Kerr et Gibson 1993). Contrairement à la majorité des dépôts de SMV présents dans le complexe volcanique de Noranda, celui de Horne se serait formé par remplacement des roches rhyolitiques sous le fond marin et non par exhalation puis précipitation des sulfures sur le fond marin (Kerr et Mason 1990, Gibson et Kerr 1990, Kerr et Gibson 1993). Cette interprétation permet de donner une explication à la discordance notée par Price (1948) entre les corps H supérieur et inférieur avec les roches hôtes. Le caractère dépôt géant de Horne viendrait du confinement des métaux sous le plancher océanique, ainsi qu'à la longévité du système hydrothermal qui, contrairement aux autres dépôts présents dans le CVN, n'aurait pas été intercoupé par des épisodes magmatiques, sans oublier son emplacement le long d'une faille synvolcanique majeure qu'est la faille de Horne Creek qui a permis la remontée de fluides hydrothermaux (Gibson, Kerr et Cattalani 2000). De plus, la mise en place de ces fluides dans le sous-plancher océanique a permis de créer une zone d'auto-étanchéité, cela a, par conséquent, empêché le refroidissement par incorporation d'eau de mer et maintenu des températures de fluides élevées (Kerr et Mason 1990, MacLean et Hoy 1991). Ce phénomène a entrainé un raffinage de la zone avec la précipitation de pyrrhotine, de pyrite et de chalcopyrite

contenant de l'or et du cuivre et a ainsi permis l'enrichissement des corps H supérieur et inférieur, ce qui est à l'origine des teneurs importantes connues dans ces corps (Barrett, Cattalani et MacLean 1991, Kerr et Gibson 1993, Cattalani, et al. 1993). En revanche, ce raffinage n'est pas observable dans la grande zone stratiforme de la Zone n°5, faible en pyrite et avec, par conséquent, des teneurs amoindries en or et en cuivre.

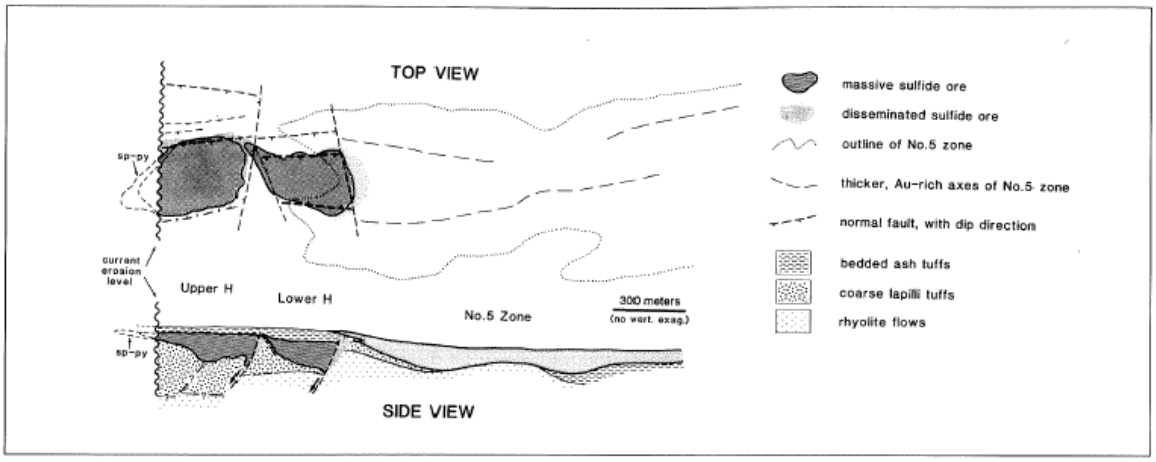


Figure 7 : Reconstruction de la vue en plan et en coupe du paléo-graben de Horne. D'après (Kerr et Mason 1990)

II-4. Connaissances théoriques en modélisation 3D géologique et géophysique

4-1. La modélisation géologique 3D

La modélisation géologique 3D est un procédé permettant une meilleure visualisation des données dans l'espace. Un des principaux avantages de ce type de modélisation est la visualisation continue des structures en profondeur et non ponctuelle, comme c'est le cas avec la majorité des données de terrain. De plus, à l'heure actuelle, la majorité des données récoltées en géologie (tout domaine confondu) est constituée de données de surface ou subsurface (inférieur à 300 m), telles que les cartes géologiques, les forages, les levés géophysiques. Les données acquises en profondeur restent très éparses et très locales, comme des levés sismiques à grande profondeur par exemple.

Afin qu'un modèle soit cohérent avec la réalité, il est nécessaire de le contraindre avec des données observées sur le terrain. La construction du modèle est obligée de respecter ces données (contraintes), telles que le positionnement de la limite entre deux formations ou bien le pendage

d'une couche géologique. Pour cela, plusieurs méthodes de calcul sont possibles, dont les plus courantes sont la méthode des champs de potentiels (Calcagno, et al. 2008, Chilès, et al. 2004) et celle de l'interpolation DSI (Le Melinaire 1992, Mallet, Discrete smooth interpolation in geometric modelling 1992). La méthode basée sur les champs de potentiels est utilisée par le GeoModeller 3D, logiciel de modélisation 3D développé par le Bureau de Recherche Géologique et Minière français (BRGM) et commercialisé par la société australienne Intrepid-Geophysic. Cette méthode repose sur le fait que les interfaces géologiques sont construites par des isovaleurs particulières du champ de potentiel interpolé à partir de données d'orientations et de points de contact entre deux interfaces. (Calcagno, et al. 2008) – (Figure 8).

La deuxième méthode, celle de l'interpolation DSI, est utilisée par le logiciel Gocad, logiciel de modélisation 3D développé par l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (ENSG) et commercialisé par Paradigm. Cette méthode consiste à utiliser un maillage triangulaire pour approcher les structures en accordant à chaque point de la structure (atome) des contraintes physiques et un degré de certitude associé à ces contraintes (Figure 9) (Mallet 1992, Le Melinaire 1992).

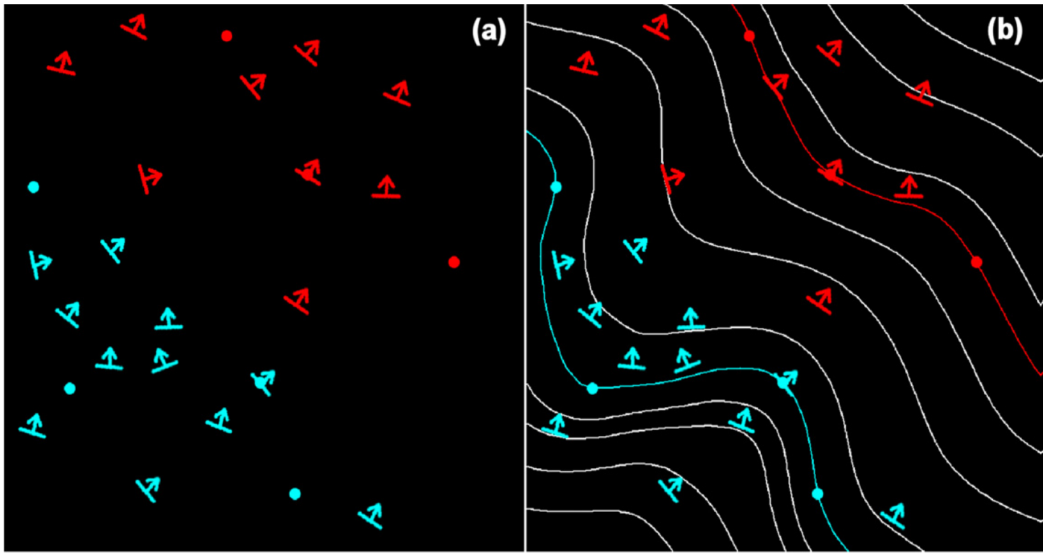


Figure 8 : Méthode des champs de potentiels. À partir des données d'entrée (a), le logiciel va calculer les différentes courbes d'isovaleurs (b). Les limites de formation étant les courbes d'isovaleurs qui passent par les points de contact. D'après (Calcagno, et al. 2008)

Cependant, les données disponibles n'étant pas toujours réparties de manière uniforme concernant la densité d'informations, ni en assez grande quantité pour couvrir l'intégralité de

la zone d'étude, il est souvent nécessaire de rajouter des données non observées pour orienter le modèle dans la direction attendue (Chilès, et al. 2004) . Ces nouvelles contraintes sont appelées contraintes « fictives » car elles ne reposent pas sur des mesures faites sur le terrain, mais sur l'interprétation et l'extrapolation que le modélisateur fait à partir des connaissances actuelles concernant sa zone d'étude. Pour qu'un modèle, et par extension une étude, soit considéré comme pertinent aux yeux de la communauté scientifique, il est important de diminuer au maximum la quantité de contraintes fictives ajoutées lors de sa réalisation (Calcagno, et al. 2008). Toutefois, il n'existe pas de valeur seuil critique concernant le nombre de contraintes fictives acceptées, celui-ci dépendant également du nombre de données disponibles sur la zone d'étude. Si peu de données sont présentes à la base, le lecteur sera plus tolérant sur le nombre de contraintes fictives ajoutées, et inversement. Il est également important de noter qu'un modèle 3D est une interprétation de la réalité parmi d'autres. Il est amené à évoluer dans le temps en fonction des nouvelles connaissances acquises.

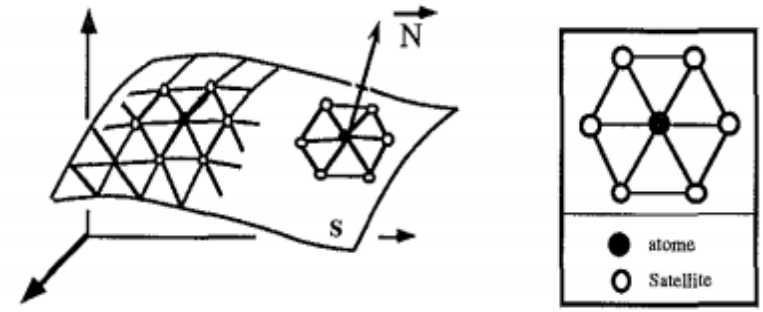


Figure 9 : Méthode DSI - Interpolation d'une surface comme étant constituée de multiples triangles d'après (Le Melinaire 1992)

4-2. Les inversions géophysiques

Les propriétés géophysiques regroupent l'ensemble des caractéristiques physiques (densité, susceptibilité magnétique, radioactivité, conductivité électrique, etc.) qui peuvent être associées à un élément, un minéral, une roche ou une formation géologique. Ces propriétés peuvent être mesurées à l'échelle centimétrique sur un échantillon ou à l'échelle kilométrique sur une zone d'étude. À l'échelle centimétrique, le résultat sera une valeur directe du paramètre mesuré, alors qu'à l'échelle kilométrique le résultat sera une carte d'anomalies. Cette dernière représente de manière relative le contraste de propriétés physiques entre les roches présentes jusqu'à une certaine profondeur (variable suivant l'appareil de mesure utilisé). À partir de ces cartes, il est

possible de donner une première interprétation de la composition du sous-sol en indiquant de manière qualitative, par exemple, la présence de roches plus ou moins denses interprétées par la gravimétrie. Pour obtenir une visualisation plus précise de la géométrie des sources causatives d'anomalies, il est possible de réaliser une inversion géophysique. Une inversion désigne le processus de calcul qui consiste à partir de données géophysiques mesurées sur le terrain, nommée réponse géophysique, afin de reconstruire une distribution tridimensionnelle de propriétés physiques et ce dernier pourrait être représentatif d'une géométrie possible des structures géologiques en profondeur (Figure 10) (Oldenburg et Li 2005, McGaughey et Milkereit 2007). Il est important de noter qu'en général une inversion de données géophysiques ne peut être réalisée que pour un seul paramètre à la fois, il n'est donc pas possible de partir de deux cartes d'anomalies gravimétriques et magnétiques pour déterminer la géométrie la plus cohérente aux deux de façon simultanée. De plus, une même réponse géophysique peut être le résultat de plusieurs géométries en profondeur. C'est le principe de non unicité (Figure 10) (Oldenburg et Li 2005). À l'inverse, une géométrie choisie ne pourra donner qu'une seule réponse géophysique. C'est pourquoi il sera ensuite essentiel de valider la géométrie proposée par l'inversion à l'aide d'autres méthodes géophysiques ou géologiques.

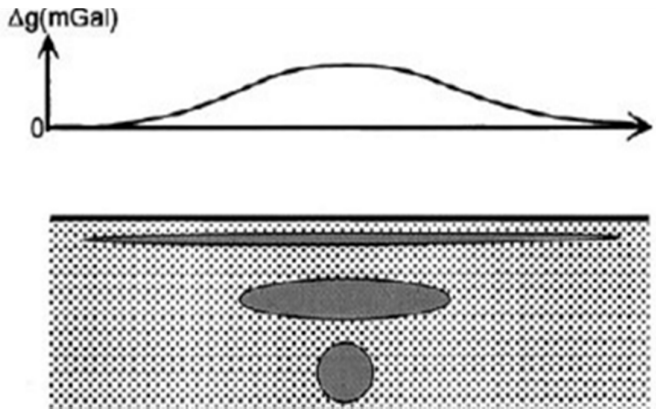


Figure 10 : Illustration du principe non unicité. Sur la figure, les 3 anomalies en profondeur créent la même réponse géophysique d'après Dubois, Diament, & Cogné, 2010

Le couplage de la géophysique avec la modélisation 3D pourrait être réalisé de 2 façons nommée : 1) *Forward problem* ou modélisation directe et 2) *Inverse problem* ou modélisation inverse. Les modélisations directes s'opposent aux modélisations inverses. Dans le premier cas, le point de départ est un modèle géologique déjà construit auquel vont être ajoutées des données de contraintes, telles que des propriétés géophysiques. Une simulation sera alors lancée afin de regarder quelle serait la réponse géophysique en surface d'un tel assemblage lithologique. Cette

réponse calculée peut alors être comparée à celle mesurée sur le terrain, dite « réelle ». Le but étant de déterminer un degré de similitude et de cohérence entre les deux afin de pouvoir apporter un certain poids, une certaine fiabilité ou « validation » au modèle réalisé. Dans le second cas, le point de départ est la réponse géophysique mesurée sur le terrain. À partir de cette réponse calculée, le logiciel va calculer un modèle possible qui donnerait une réponse géophysique semblable ou, tout du moins, le plus proche possible. Ce modèle pourra alors servir de guide / de piste, ou même de données de contraintes, pour la réalisation du modèle géologique (Figure 11).

La modélisation directe est utilisée essentiellement dans la phase de validation d'un modèle afin de confirmer que la géométrie présente dans le logiciel est vraisemblable. La modélisation inverse, quant à elle, est utilisée durant la phase de conception du modèle, car elle permet d'apporter de nouveaux éléments à la compréhension de la zone d'étude et, plus précisément, de la présence et de la géométrie des formations en profondeur.

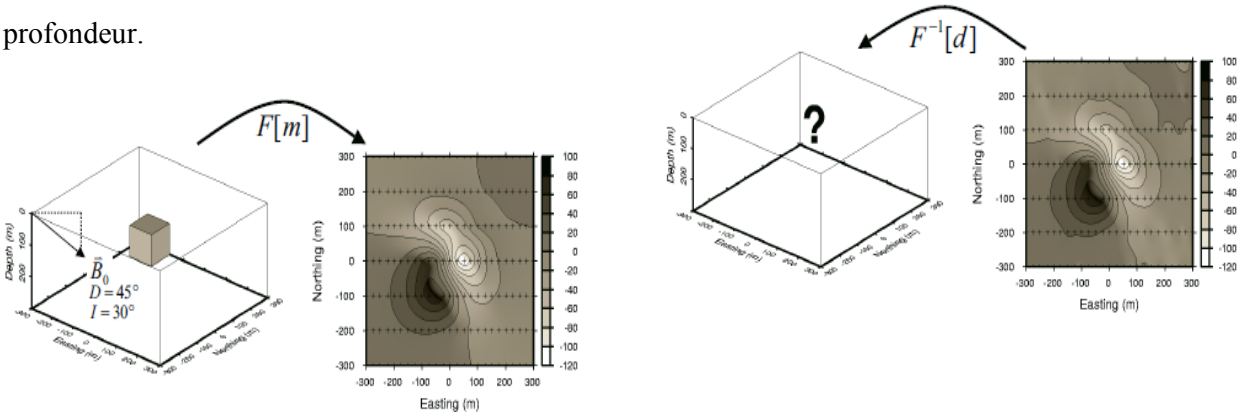
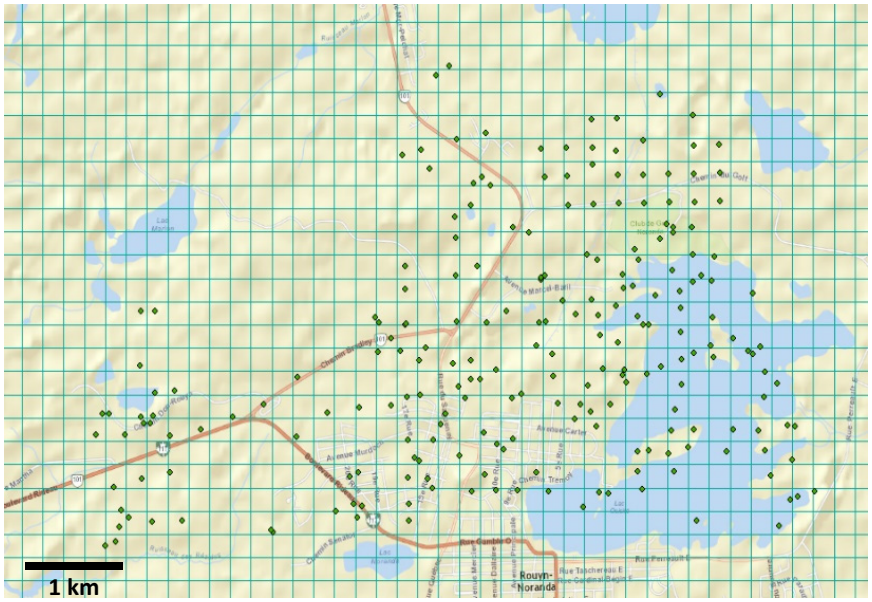


Figure 11 : Illustration du « forward problem » (à gauche) et du « inverse problem » (à droite) d'après (Oldenburg et Li 2005)

II-5. Données disponibles et manquantes

Géologie

La propriété des secteurs des anciennes mines Horne et Quemont ainsi que le gisement Horne 5 appartient aujourd'hui à la société Falco Resources. Dans le cadre de ce doctorat, Falco Resources a bien voulu mettre à disposition l'ensemble de ses données concernant le gisement Horne 5. Cela inclut notamment les études de forages ainsi que les descriptions de carottes. Ainsi, plus de 1106 forages ont pu être récupérés et traités. Prenant en compte la future recherche transversale de différentes échelles, cette quantité importante de données risquerait d'entrainer des incohérences sur la modélisation 3D. Nous avons décidé de réaliser un tri en fonction de deux paramètres : 1) la profondeur maximum du forage – plus cette dernière est importante, plus la quantité d'informations géologiques utilisables le sera également et 2) la surface d'étude – plusieurs grilles ont été réalisées avec des mailles carrées de 100 ou 200 m, seul le forage le plus profond est récupéré. Ce premier tri a permis de passer de 1106 à 362 forages pour la grille carrée de 100 m ou à 263 forages pour la grille de 200 m (Figure 12). Les descriptions de forages ont ensuite été modifiées afin qu'un minimum d'épaisseurs de couches ne soit inférieur à 10 m ; des épaisseurs inférieures seront ignorées dans la modélisation 3D. Les regroupements se sont faits en fonction de la nature et de l'affinité lithologique des roches.



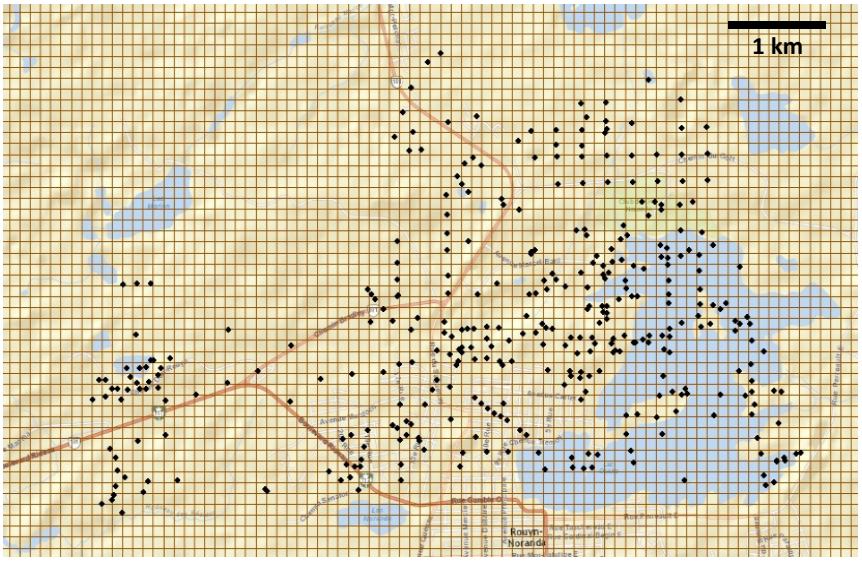


Figure 12 : Cartes de Rouyn Noranda indiquant la localisation des forages utilisés (en haut) pour une grille carrée de 200 m (en bas) pour une grille carrée de 100 m

Le ministère de l'Energie et des Ressources naturelles (MERN) a également mis à notre disposition l'ensemble de sa base de données SIGEOM portant sur nos différentes zones d'études. Cela inclut les données lithologiques, les mesures structurales, les failles, les descriptions d'affleurements, les résultats d'analyse géochimiques, etc.

Géophysique

Durant l'année 2018, plusieurs travaux ont été réaliser. Tout d'abord, une base de données contenant un ensemble d'échantillons standards avec leurs propriétés physiques devrait être mise à notre disposition par le Ministère lors de la première partie de l'année 2018. Cette base de données servira de référence lors de la calibration des données issues des diverses campagnes de mesures géophysiques réalisées durant ce doctorat. En effet, une des réalisations prévue en 2018 est une campagne de mesures de susceptibilité magnétique réalisée sur l'ensemble des forages sélectionnés au sein de la société Falco Resources. Cette campagne de mesures permettra également de réaliser des mesures de densité sur certains échantillons. Les résultats serviront ensuite de données d'entrées lors de la réalisation des inversions géophysiques 3D.

De plus, une campagne gravimétrique est actuellement en cours de réalisation par la société Abitibi Géophysique. Cette campagne est effectuée en surface sur environs 5,3 km² autour du gisement de Horne 5 avec des stations espacées d'environ 170 m en EO et 100 ou 150 m en NS

(Figure 13). Les résultats issus de cette campagne serviront également de données d'entrées lors de la réalisation des inversions géophysiques 3D.

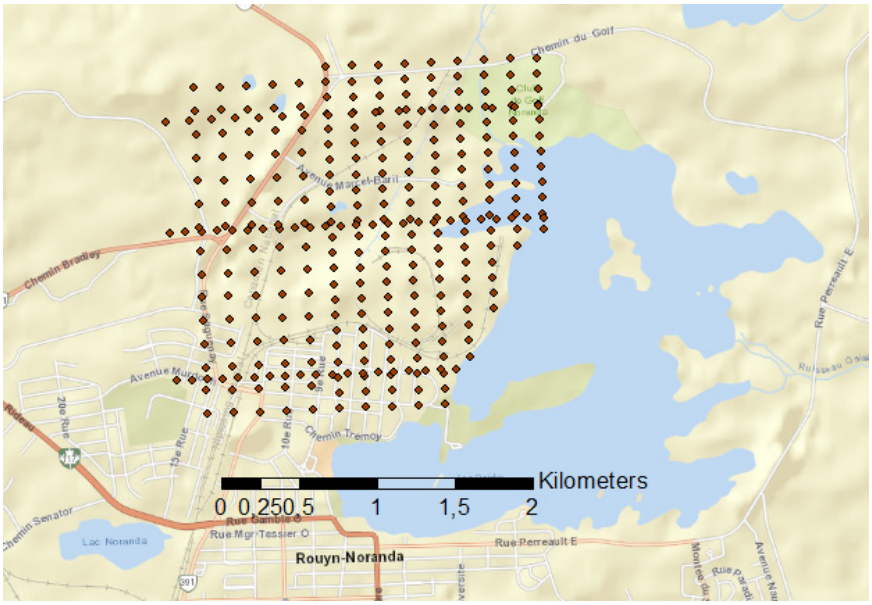


Figure 13 : Carte de localisation des différents points de mesures réalisés lors de la campagne gravimétrique

De plus le MERN devrait mettre à notre disposition sous peu les derniers relevés magnétiques et gravimétriques réalisés dans la région en haute définition. À cela devrait également s'ajouter des informations sismiques communiquées par le projet Metal Earth et, notamment les résultats de leur levé sismique traversant l'ensemble du camp central du nord au sud.

III. Méthodologie envisagée

Les modèles géologiques guident l'interprétation des données géophysiques ou dans le choix des résultats d'inversion. La stratégie pour l'ensemble du projet sera de la structure locale peu profonde (< 2km), profondeur moyenne (5 à 10 km) sectorielle, vers une grande profondeur (15 à 20 km) à l'échelle crustale. Les quatre composants principaux de la réalisation sont :

- Mesures des propriétés physiques ;
- Création des modèles tridimensionnels en intégrant les inversions de données géophysiques dans la conception des modèles géologiques tridimensionnels ;

- Caractérisation des facteurs significatifs pour discrétiser la minéralisation, l'altération, la déformation et le changement de lithologie à trois échelles ;
- Développement d'un protocole de modélisation 3D à multiples échelles.

III-1. Réalisation de mesures géophysiques

1.1 Méthode utilisée

Les mesures géophysiques réalisées durant ce projet de doctorat porteront sur les mesures de susceptibilité magnétique et de densité.

Les mesures de susceptibilité sur affleurement ou sur carottes de forages seront pratiquées avec l'appareil de mesure portatif KT-20 vendu par la société TerraPlus. Il permet de mesurer la susceptibilité et la conductivité grâce à deux capteurs différents (1 et 10 KHz). Pour les essais de susceptibilité, le capteur 1 KHz sera utilisé, car cela permettra d'atténuer le bruit parasite et d'avoir une valeur moyenne volumique. En revanche, le capteur 10 KHz sera utilisé dans le cadre de mesures de conductivité, car la sensibilité du capteur sera plus élevée (0,1 S/m) et les résultats plus précis. Les mesures peuvent être réalisée selon deux modes : ponctuel et scan. Le mode ponctuel, comme son nom l'indique, permet de réaliser une seule mesure sur une zone très localisée, alors que le mode scan permet de réaliser un ensemble de mesures prises à intervalle régulier sur une distance choisie. Les résultats seront ainsi analysés et traités via le logiciel GeoViewer ou Excel. Ces nouveaux résultats, s'ils sont concluants, permettront d'ajouter des données de contraintes dans nos modèles géologiques et géophysiques. Des mesures de densité et de radioactivité pourraient être aussi réalisées en fonction du temps et de la disponibilité des échantillons, afin de compléter les propriétés géophysiques liées à chaque roche.

Les mesures de gravimétrie seront effectuées par la société Abitibi Géophysique. La méthode utilisée consistera à réaliser des points de mesures en surface le long de plusieurs profils définis par nos soins et à intervalle régulier. Cet ensemble de résultats permettra d'obtenir une carte d'anomalie gravimétrique et pourra servir de données d'entrées afin de contraindre nos différents modèles 3D.

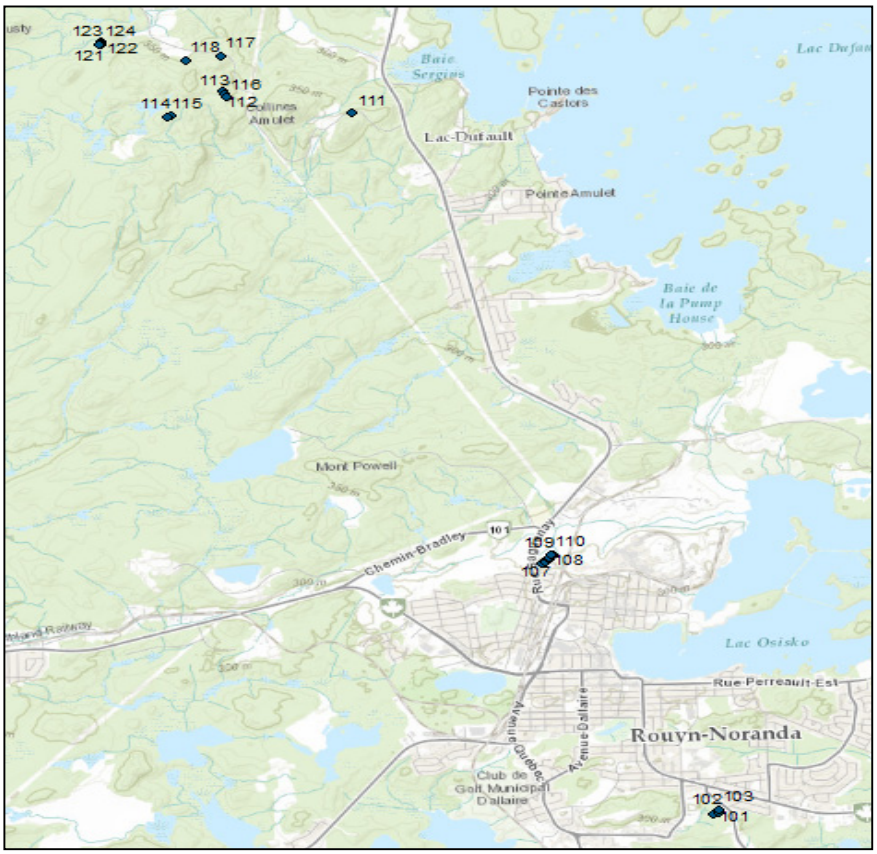
L'ensemble des résultats provenant de mesures géophysiques quelles qu'elles soient pourra ensuite être comparé à la base de données de référence fournie par le Ministère. Cette base est actuellement en cours de réalisation par l'équipe de C. Dupuis de l'Université Laval. Son objectif est d'associer les différentes lithologies présentes dans la région à des valeurs (ou

plages de valeurs) de mesures géophysiques. Ainsi, à partir de cette base et des mesures effectuées sur le terrain, il nous sera alors possible de remonter à la lithologie associée et inversement, déterminer, en fonction de la lithologie présente, la valeur de propriétés physiques associées. Cela sera une étape indispensable pour passer d'un modèle géophysique à géologique et inversement, afin d'obtenir un résultat / modèle final cohérent associant aussi bien géologie que géophysique.

1.2 Mesures faites sur le terrain

Des premières mesures sur le terrain ont été réalisées à l'été 2017 aux alentours de Rouyn-Noranda. La susceptibilité a été relevée sur un panel de 26 échantillons pouvant être classés en six catégories différentes (basalte, gabbro, roches felsiques indifférenciées, sulfures massifs, dalmatianite, rhyolite et dacite). Les résultats (Figure 14) ont montré qu'il était possible de différencier grâce au magnétisme certaines zones d'altération (dalmatianite), ainsi que les sulfures massifs, puisqu'ils possèdent une susceptibilité élevée. Cependant, concernant les autres lithologies présentes, la différenciation peut se révéler plus compliquée. En effet, il semble que les roches basaltiques aient des valeurs de susceptibilité relativement faibles, mais il en est de même pour d'autres roches de nature différente. De plus, il est important de remarquer la grande variabilité qu'il peut exister entre les valeurs de susceptibilité pour une même lithologie. Cela peut provenir de différences de composition dues aux différents processus magmatiques ou simplement d'échantillons non représentatifs.

Lithologie	**Numéro d'affleurements**
Basalte	101 ; 102 ; 103 ; 116 ; 117 ; 123 ; 126
Dacite	114
Dalmatianite	112 ; 121
Gabbro	105 ; 108 ; 111 ; 115 ; 125
Rhyolite	104 ; 107 ; 118
Roches felsiques indifférenciées	113 ; 124
Sulfure massif	110 ; 122



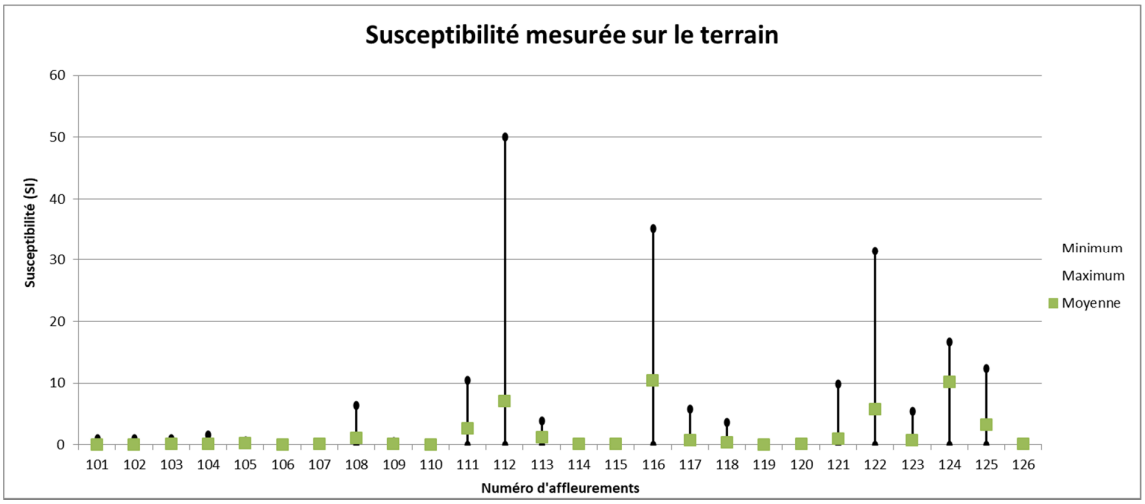


Figure 14 : Valeurs de susceptibilité mesurée sur le terrain suivant les affleurements. (En haut) Tableau des valeurs. (Au centre) Carte de localisation des affleurements. (En bas) Correspondance avec la lithologie

Dans le cadre de cette journée de terrain, la mesure de la susceptibilité directement sur l'affleurement a contribué à la détection de la limite entre deux formations (basalte / dyke felsique). En effet, la différence de susceptibilité était assez importante pour que le changement soit remarquable de façon nette quand la limite entre les deux était franchie. Ainsi, cela confirme l'apport de la géophysique à la géologie et à la détermination des lithologies.

1.3 Mesures réalisées sur les carottes de forages

Dans le cadre de ce doctorat, une campagne de mesure de susceptibilité magnétique et de gravimétrie devrait être réalisée sur les carottes de forages de la société Falco Resources. Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence la possibilité de différencier les lithologies par les méthodes géophysiques et également de servir de données d'entrées lors de la réalisation des inversions géophysiques.

Il est important de noter qu'une phase de calibration sera nécessaire afin de garantir les résultats. Cette calibration sera possible à partir d'échantillons de référence fournis par le Ministère.

III-2. Création de modèles tridimensionnels

Un modèle géologique sera réalisé pour chaque échelle. Ce modèle servira de base dans la réflexion géologique et géophysique rattachée à ce projet de doctorat. Suivant la quantité d'informations disponibles ainsi que la précision et l'homogénéité de ces données, il sera réalisé sous le logiciel GeoModeller 3D ou Gocad. L'inventaire utilisé pour la conception du modèle sera basé sur :

- Les descriptions de carottes de forage obtenues via la société Falco Resources
- Les cartes et sections géologiques issues du SIGEOM ou de la base de données du MERN
- Les données lithologiques et pendage associé issues de la base de données SIGEOM du MERN
- La carte topologique, ou MNA (Modèle Numérique d'altitude), obtenue via le site du gouvernement canadien GeoGratis (Figure 15)

Ce modèle sera raffiné tout au long du projet afin d'obtenir comme résultat final un modèle géologique précis et réaliste des formations géologiques présentes aux différentes échelles, à la fois en surface et en profondeur. Ce modèle aura deux objectifs ou utilisations : 1) servir de

base aux modélisations directes et 2) aider à réaliser la séparation entre les anomalies résiduelles locales et celle du champ régional.

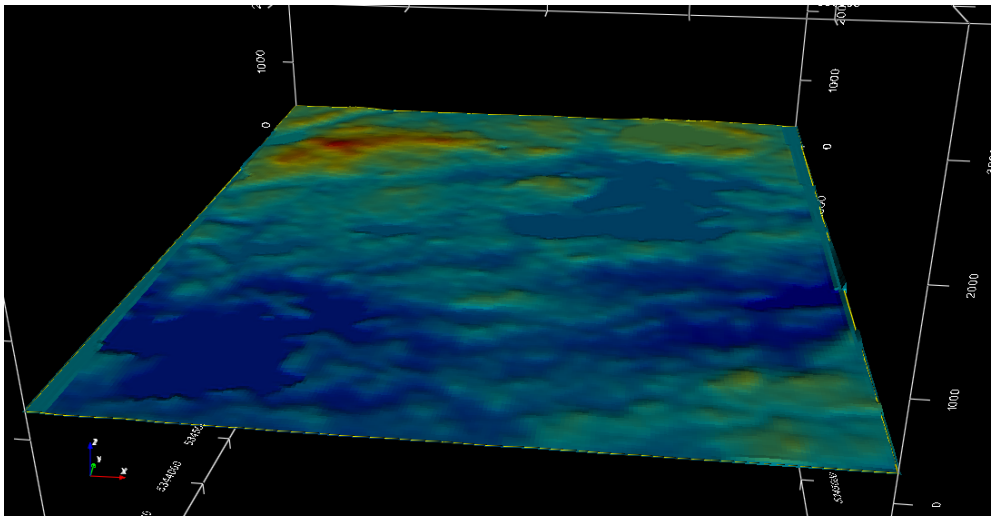


Figure 15 : Modèle numérique d'altitude (MNA) en 3 dimensions de la propriété élargie de Horne 5, réalisé avec le logiciel GeoModeller 3D

2.1. Compilation des modèles 3D existants

Une compilation des différents modèles existants, tels que celui d'Éric Kemp concernant le pluton de Flavrian ou celui de Francine Fallara et Marc Legault sur le camp central sera réalisée. Cette compilation servira de base à l'élaboration des nouveaux modèles. En effet, il serait peu productif de partir de zéro, alors que des projets de modélisation 3D portant sur la zone d'étude ou une partie de cette zone ont déjà été réalisés.

2.2. Définition des éléments clés dans un modèle propre à son échelle

Comme décrit dans l'introduction de ce chapitre, la réalisation d'un modèle 3D quel qu'il soit nécessite des données d'entrées. Ces données peuvent être de nature géologique (lithologique, structurale, forages, etc.), géochimique (analyse des éléments traces, présence de certains minéraux, etc.), géophysique (magnétisme, gravimétrie, et sismique, etc.) ou même simplement de nature géographique (topographie, localisation des cours d'eau, etc.). Cependant, suivant l'échelle étudiée, les données d'entrées vont varier notamment sur la densité d'informations. Par exemple, à l'échelle du camp central, une mesure structurale tous les 5 km^2 serait amplement suffisant. Toutefois, à l'échelle du Blake River, cela représenterait une quantité d'informations trop importante, c'est pourquoi il faudrait réduire à une mesure structurale tous

les 15 km^2. Inversement pour l'échelle du gisement, il faudra augmenter cette proportion avec environ une mesure structurale tous les 200 m. Bien entendu, cela est théorique. Dans les faits, la quantité d'informations requises n'est pas demandée suivant une surface, mais suivant la pertinence de l'information. Si des mesures sont qualifiées comme étant des données majeures, elles doivent être prises en compte, peu importe la distance qui les sépare. Cela pose alors la question de la pertinence d'une donnée ainsi que de la généralisation. Comment déterminer quelle information sera conservée lors du passage de l'échelle du gisement à celle du camp central puis celle du Blake River ? La question même de la conservation de la donnée se pose. En effet, suivant l'échelle, les structures observées ainsi que le but recherché ne sont pas les mêmes. Par conséquent, il n'est pas forcément pertinent de vouloir conserver certaines données d'une échelle à l'autre. En revanche, une généralisation des observations et des résultats apportés à l'échelle précédente pourrait se révéler intéressante.

De plus, il est également important de bien définir les unités qui doivent être modélisées. Dans notre cas, la question s'est posée entre modéliser des formations stratigraphiques ou des formations lithologiques. Nos recherches nous ont montré que les différentes formations stratigraphiques étaient composées d'une succession d'unités lithologiques assez similaires d'une formation à l'autre. Par conséquent, les formations stratigraphiques dans leur ensemble possèdent une réponse géophysique relativement proche, ce qui entrainerait une complexité très importante dans la modélisation. De plus, les connaissances actuelles en matière de mise en place des différentes formations les unes par rapport aux autres dans le temps sont encore relativement faibles. Pour les raisons citées précédemment, nous avons fait le choix de nous orienter vers une modélisation lithologique tenant plus compte de la nature des roches que de leur âge.

Cette section permettra de répondre à ces diverses questions en définissant quels sont les éléments clés d'un modèle tridimensionnel suivant son échelle d'étude.

2.3. Outils de modélisation 3D et objectifs associés

La modélisation tridimensionnelle peut être réalisée de bien des manières suivant l'objectif à atteindre et le contexte dans lequel a lieu la modélisation. Chaque outil de modélisation apporte des données spécifiques mais demande également des données spécifiques. Citons en exemple le cas de Geosoft; il permet de réaliser des inversions géophysiques en trois dimensions. Pour cela, il est nécessaire de lui fournir des informations géophysiques en surface, et si possible en

profondeur – via des forages. Le résultat sera un modèle géophysique indiquant dans l'espace où se situent les corps avec la plus forte et la plus faible susceptibilité dans le cas d'une inversion magnétique. Ainsi, à partir de ce constat, il est aisé de comprendre que plusieurs outils ou logiciels de modélisation seront utilisés tout au long de ce doctorat.

Les modèles géologiques seront réalisés avec les logiciels GeoModeller 3D et Gocad. GeoModeller 3D est un logiciel de modélisation géologique construit à partir d'une colonne stratigraphique. Par conséquent, il est nécessaire de connaitre la chronologie de dépôts des différentes formations de la zone d'étude avant de pouvoir passer à la modélisation. Ce logiciel se révèle également très utile lors de la phase de validation grâce aux inversions directes. En effet, il est possible d'attribuer à chaque formation des propriétés physiques. Le logiciel est alors capable de reproduire la carte d'anomalie en surface résultant de la géométrie des différentes formations et des propriétés physiques associées. Il est ensuite aisé de faire une comparaison visuelle entre la carte d'anomalie extraite du logiciel et celle mesurée sur le terrain, afin de déterminer si la géométrie proposée par le modèle est réaliste ou non. Le logiciel Gocad est également un logiciel de modélisation, mais il n'est pas, quant à lui, basé sur une pile stratigraphique. Cela signifie qu'il est alors possible de modéliser suivant la lithologie. Le fonctionnement de ce logiciel sera détaillé ultérieurement.

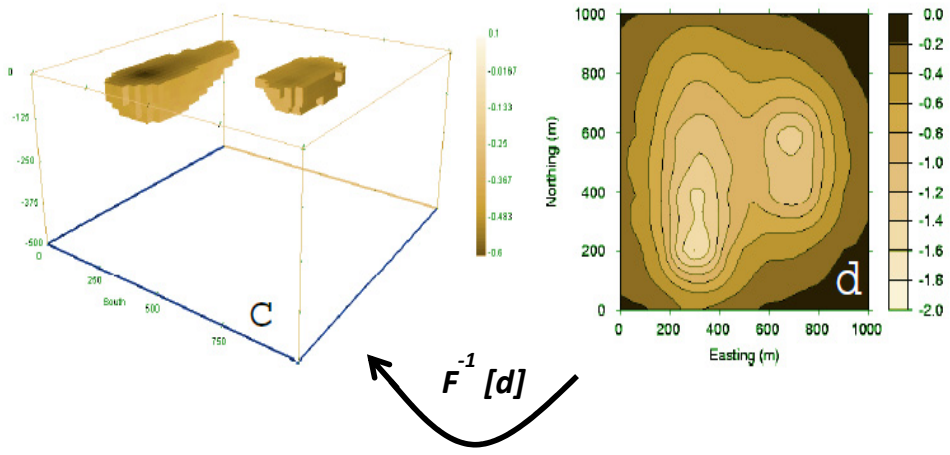


Figure 16 : Illustration du principe d'inversion géophysique. A droite, la carte d'anomalie en données d'entrées. A gauche, le modèle 3D calculé pour correspondre à la donnée d'entrée

Les modèles géophysiques seront, quant à eux, effectués avec le logiciel Geosoft. Il permet à la fois de réaliser le traitement d'image, notamment des cartes d'anomalies géophysiques, mais

également de réaliser les inversions géophysiques. Il se base sur la carte d'anomalie géophysique pour déterminer de façon graduelle une géométrie en profondeur. Il peut être contraint par l'intermédiaire de forages, afin de se rapprocher au maximum d'une réalité possible. Le résultat est un modèle en trois dimensions qui peut servir de base à l'élaboration d'hypothèses sur la géométrie des formations en profondeur (Figure 16). Dans notre cas, le modèle géologique servira également de base à la réalisation de modélisations géophysiques 3D directes via le logiciel GeoModeller 3D.

Résultats Obtenus

Durant cette année et demi de doctorat, seul le logiciel GeoModeller 3D a été utilisé. Par conséquent, les résultats présentés n'ont été réalisés qu'avec ce logiciel. Le logiciel Gocad permettra peut-être d'apporter des réponses à certains problèmes évoqués ci-dessous.

Le premier modèle géologique sur lequel j'ai travaillé, est celui du gisement Horne 5. Comme dit précédemment, la première étape de construction d'un modèle géologique 3D dans GeoModeller est la création de la pile stratigraphique qui servira de base au logiciel pour réaliser ses calculs. Malheureusement, nous nous sommes heurtés à un obstacle majeur : aucun log stratigraphique n'a été réalisé dans la zone d'étude dû à la trop grande complexité des couches présentes. En effet, celles-ci ne semblent pas pouvoir être datées et c'est pourquoi les seules informations que nous pouvons trouver sont des informations lithographiques, c'est-à-dire concernant la composition des couches, et non stratigraphiques, c'est-à-dire leur position chronologique les unes par rapport aux autres. En attendant de trouver une solution à ce problème qui empêche, pour l'instant, toute réalisation d'un modèle géologique 3D avec le logiciel GeoModeller, j'ai quand même décidé d'implanter l'ensemble des données de forages obtenues par la société Falco dans le logiciel. J'ai ainsi commencé par trier, analyser et regrouper les différentes couches présentes dans les descriptifs de forages afin qu'aucune ne soit inférieure à 5 ou 10 m d'épaisseur, une épaisseur moindre n'étant pas modélisable. J'ai ensuite émis l'hypothèse que si les couches lithographiques étaient assez épaisses et peu de lithologie similaire en nature, il serait alors peut-être possible de relier les forages entre eux, dans un premier temps, puis affiner ce tracé par des méthodes géophysiques comme la gravimétrie, dans un second temps. Malheureusement, quand l'ensemble des forages est compilé dans le GeoModeller, on s'aperçoit très vite qu'il n'est pas possible de relier les forages entre eux suivant la lithologie (cf. Figure 17). Il y a beaucoup trop d'alternances de couches de

même nature et d'épaisseur relativement faible pour permettre d'affirmer que deux couches de forages distincts appartiennent à la même formation.

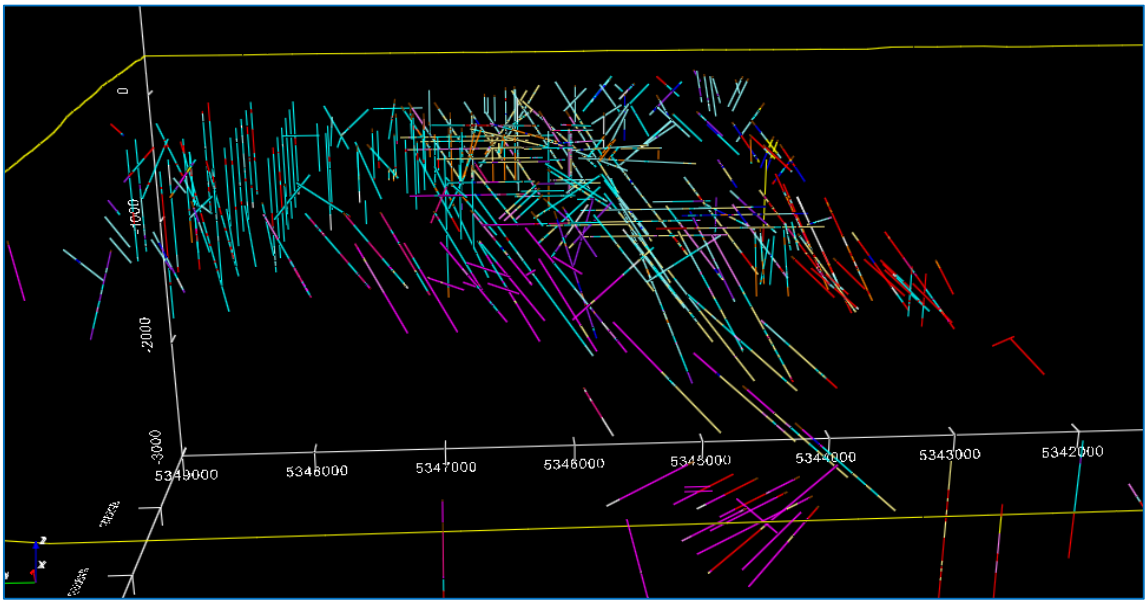


Figure 17 : Implantation de l'ensemble des forages disponible pour la zone autour du gisement Horne 5 sous GeoModeller 3D

2.4. Développement d'outils de modélisation assistée

Actuellement, la majorité des gisements de surface ou subsurface ont été découverts Un des principaux enjeux repose maintenant sur la découverte de gisements en profondeur. Pour répondre à cette problématique, la géophysique est de plus en plus étudiée et utilisée. En effet, cette dernière permet de mettre en évidence des anomalies (positives ou négatives) qui peuvent être des preuves de l'existence de gisements métallifères. Malheureusement, ces anomalies deviennent de plus en plus faibles en profondeur dues : 1) à la profondeur d'investigation des appareils géophysiques et 2) au bruit causé par les formations géologiques situées au-dessus et autour de l'anomalie. En effet, chaque lithologie produit une réponse géophysique et l'accumulation de toutes ces réponses va venir masquer la présence d'une anomalie importante en profondeur. Afin de réduire l'impact de la profondeur sur la détection d'anomalies, nous proposons de soustraire la réponse géophysique émise par les premiers mètres jusqu'aux premiers kilomètres de roches à la réponse géophysique régionale, afin de pouvoir mettre en évidence les réponses géophysiques sous-jacentes et donc de potentielles anomalies majeures associées à des gisements métallifères.

Concernant la mise en pratique, le modèle géologique 3D servirait de base. À l'aide des modélisations directes, il sera possible de déterminer sa réponse géophysique (magnétisme et gravimétrie, notamment). Cette réponse pourra alors être soustraire de la réponse géophysique globale mesurée sur le terrain. Cette méthode s'applique aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale. La seule différence entre les échelles proviendra du niveau de précision attendue, l'échelle régionale sera possiblement moins précise, mais pourra atteindre des profondeurs plus profondes que l'échelle locale, plus précise mais moins profonde.

III-3. Caractérisation des facteurs significatifs pour l'exploration minière

Cette avant dernière section est consacrée à la caractérisation de facteurs significatifs pour l'exploration minière, tels que l'altération engendrée par la mise en place d'un SMV. Les facteurs significatifs étudiés dans cette section seront essentiellement l'altération associée aux SMV et la caractérisation des propriétés optimales de levés géophysiques suivant l'objectif recherché (distance entre les points de mesure, hauteur de l'appareil de mesure, profondeur atteinte, etc.). Ces deux éléments permettront la sauvegarde de coûts financiers, ainsi que la détermination de nouvelles zones de prospection. Les points suivants décrivent les différentes étapes qui seront suivies dans cette section. Cependant elles n'ont pas été, à l'heure actuelle, approfondies, c'est pourquoi leur description est très succincte, voire inexistante.

3.1. Compilation des modèles du potentiel minéral faits par MERNQ

3.2. Caractérisation des unités géologiques et des zones d'altération

Les données lithogéochimiques du SIGEOM seront traitées à l'aide du logiciel Lithomodeleur. Ces données permettront de caractériser les différentes lithologies, mais aussi des zones d'altération à partir de deux méthodes spécifiques à Lithomodeleur, soit 1) la méthode des bilans de masse sur précurseurs modélisés (Trépanier et al. 2015, 2016) et 2) les calculs de minéraux normatifs permettant la construction d'indice d'altération (Trépanier et al. 2015).

À partir de ces résultats, des cartes d'altération pourront être réalisées. Ces dernières pourront servir de guides / contraintes lors de la réalisation de cartes de potentiel en permettant de cibler des zones favorables à la présence sous-jacente de gisements métallifères.

Résultats obtenus

Les cartes d'altérations présentées ci-dessous ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcMap, et sont basées sur les analyses géochimiques provenant du ministère et étudiées à partir du logiciel Lithomodeleur.

Le partenariat entre le Ministère et ce doctorat m'a permis d'avoir accès à l'ensemble de leur base de données géologiques concernant la région du Blake River. Parmi les informations contenues dans cette base se trouvent toutes les analyses géochimiques réalisées sur des échantillons de surface provenant de nombreux endroits de la région. Le nombre total d'échantillons analysés s'élevait à un peu moins de 40 000, répartis de façon hétérogène sur l'ensemble de la région (cf. Figure 20). À partir de ces données, l'objectif était de réaliser des cartes d'altérations afin de pouvoir identifier des zones d'altérations possiblement dues à la présence d'un gisement de type VMS en profondeur. Les altérations caractéristiques de ces gisements sont une altération en séricite, en chlorite ou en albite (cf. Figure 18). Cependant, une lecture basique des résultats d'analyses géochimiques ne permet pas d'affirmer ou d'infirmer la présence d'altération, c'est pourquoi nous avons utilisé le logiciel Lithomodeleur. Ce logiciel développé par le CONSOREM à Chicoutimi, permet d'implanter les points de mesure au sein de nombreux graphiques géochimiques (Al_2O_3 vs TiO_2, diagramme de Hugues, Fe_2O_3/K_2O vs SiO_2/Al_2O_3 etc.). La première étape pour arriver à un résultat graphique consiste à reformater notre table de données afin qu'elle puisse être lue par le logiciel, notamment avec les noms donnés à chaque élément ou molécule. Une fois cette étape finie, il est alors possible d'importer la base de données dans le Lithomodeleur. Le nombre de diagrammes disponible dans le logiciel est relativement important, dans notre cas, seuls ceux susceptibles de 'indiquer la présence d'altération nous intéressait. C'est pourquoi j'ai décidé d'utiliser le diagramme de Plot qui permet de classer les échantillons en fonction de leur composition chimique entre les roches saines : basalte (FB), dacite (FD), rhyolite (FR), andésite (FA) et picrite (FP) et les roches présentant de l'altération : chlorite-pyrite (AFEMG), albite (ANA), épidote-carbonate (ACA), séricite-feldspath potassique (AK).

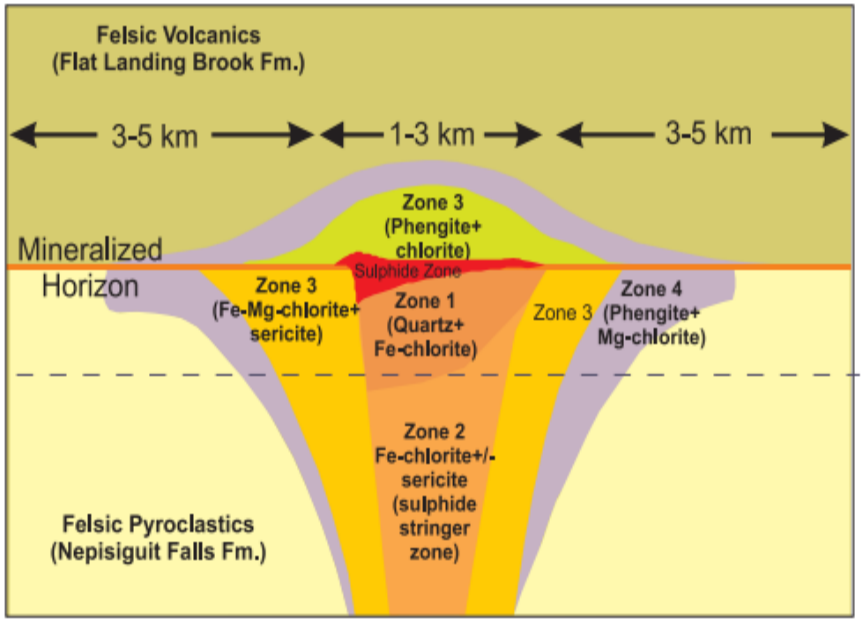


Figure 18 : Zone d'altération autour d'un VMS

À partir du graphique (cf. Figure 19), j'ai pu extraire les quatre sous-ensembles d'échantillons altérés : ACA, AFEMG, AK et ANA. Il est important de noter que ces sous-ensembles ne sont pas fiables à 100 %. En effet, la détermination de la présence d'altération à partir des analyses chimiques dépend énormément de la lithologie primaire de la roche et, de ce fait, de ses composants initiaux. Dans le cas où la lithologie primaire est inconnue, seules les valeurs extrêmes sont considérées comme preuves formelles de la présence d'altération. La base de données géochimiques du Ministère n'indiquant par la lithologie primaire de chaque échantillon analysé, nous nous sommes retrouvés dans ce cas. Cependant, en lecture graphique, cela est relativement compliqué d'estimer les valeurs extrêmes, c'est pourquoi l'ensemble des données appartenant au même sous-ensemble graphique a été exporté et analysé sous ArcMap. Cette information sera capitale lors de l'interprétation de la carte d'altération résultante.

De plus, à la table de données de référence a également été ajoutée via le logiciel Lithomodeleur la valeur d'indices de Chlorite, Séricite, Saturation Albite-Séricite, Saturation Séricite et CCPI (chlorite, carbonate, pyrite) (cf. annexe 1). Ces indices permettent de déterminer la présence d'altération, mais bien qu'ils portent le nom de certains minéraux, ils ne permettent pas d'identifier ces minéraux avec précision. En effet, plusieurs combinaisons peuvent expliquer un ratio élevé. Par exemple, un ratio élevé de l'indice Séricite peut provenir, soit d'une séricitisation soit d'une altération potassique, etc. (Trépanier 2011).

Comme dit précédemment, l'ensemble de ces nouvelles données ont ensuite été analysées avec le logiciel ArcGIS afin de réaliser des cartes de prédiction. L'analyse s'est faite en deux temps, concernant les données extraites du graphique, elles ont juste été implantées sur la carte géologique pour permettre de voir où se situent les échantillons altérés (cf. Figure 21). ; concernant les cartes de prédictions, elles ont, quant à elles, été réalisées à partir des indices unaires en utilisant l'outil d'interpolation « Voisins Naturels » du logiciel (cf. Figure 22). Cet outil permet de prédire la valeur d'une case en fonction de la valeur de celles avoisinantes. Il existe d'autres outils permettant d'interpoler des données sous forme de carte, mais l'outil « Voisins Naturels » semble être le mieux adapté au cas présent.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous. Comme nous pouvons le constater, certaines interpolations semblent peu réalistes. Par exemple, sur la carte D de la figure 22, la zone sud semble présenter une altération relativement importante. Or quand on regarde la distribution des échantillons analysés, on peut remarquer que peu sont disponibles dans cette zone. Par conséquent, cette « auréole d'altération » est à prendre avec attention, car peu fiable.

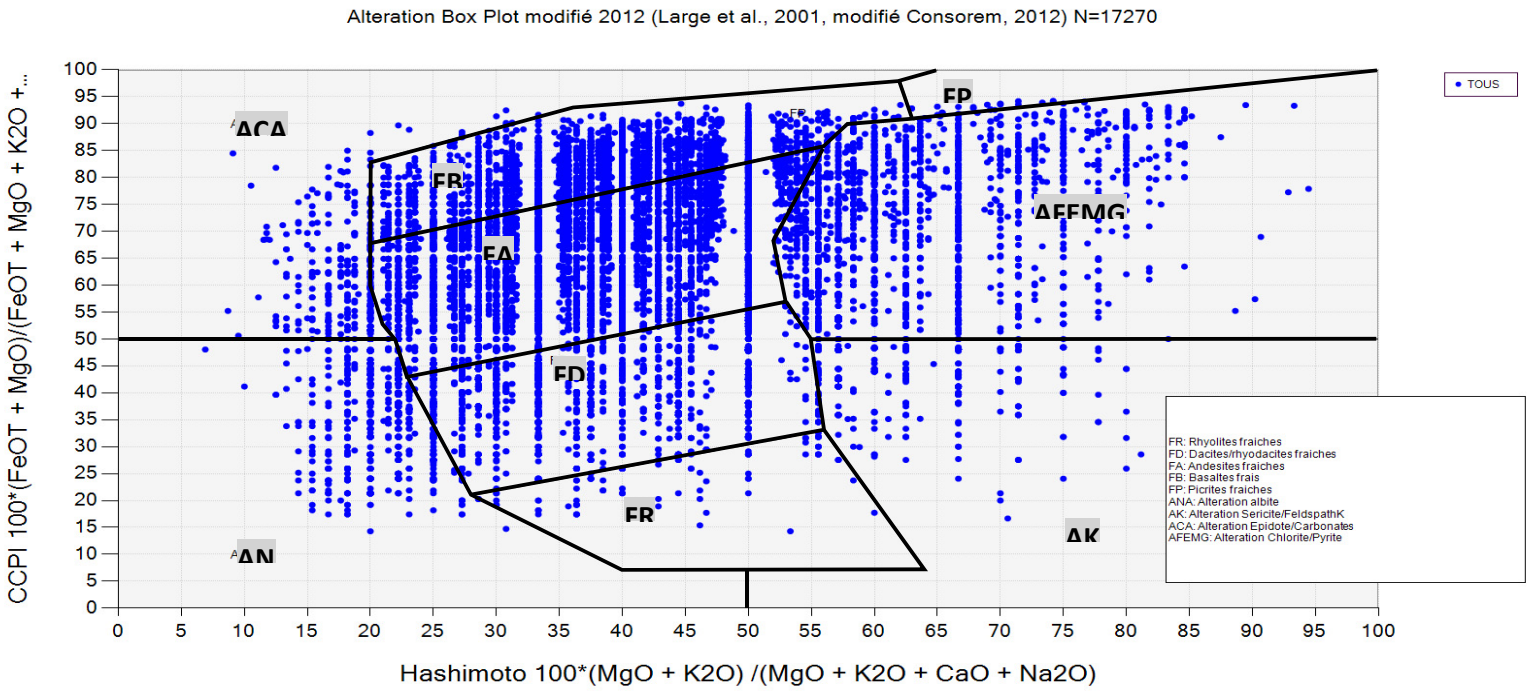


Figure 19 : Diagramme de Plot modifié. L'ensemble des points bleus représente les échantillons analysés

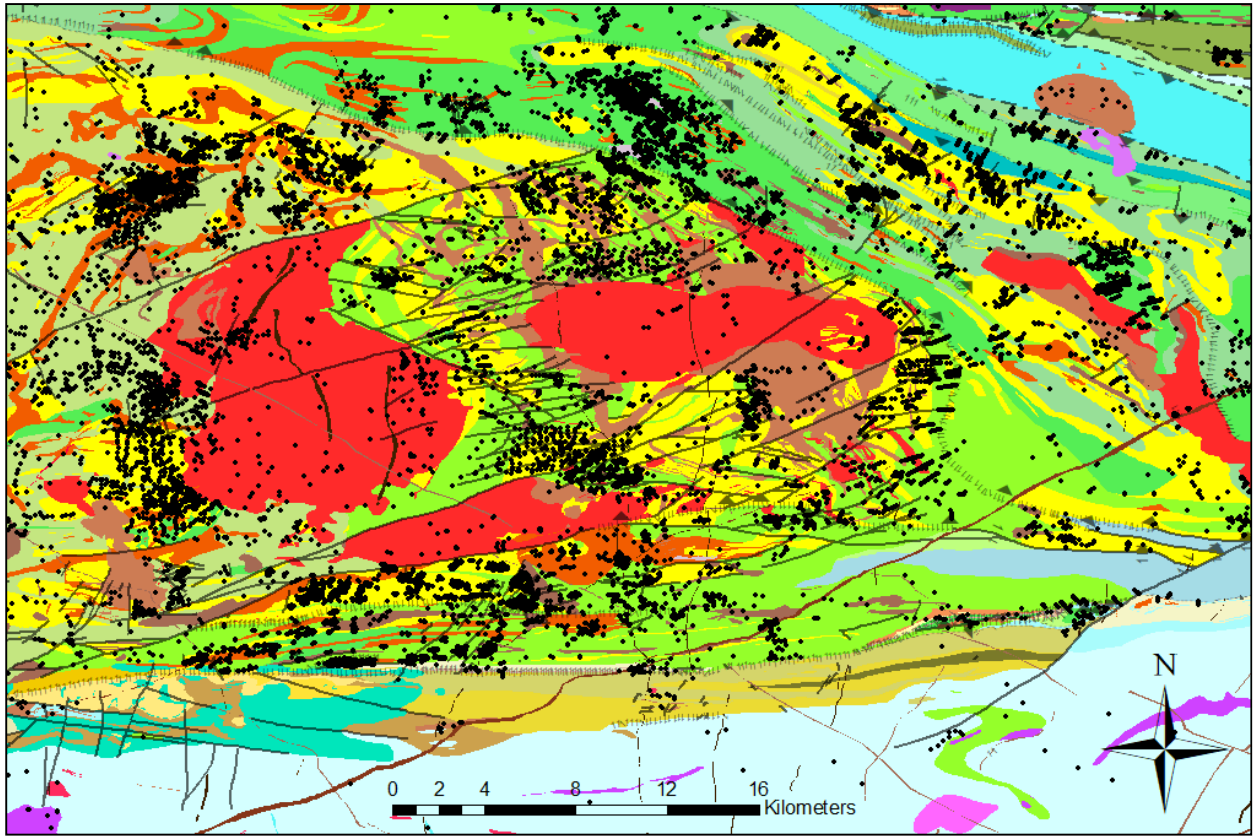


Figure 20 : Carte de l'emplacement des échantillons analysés disponibles

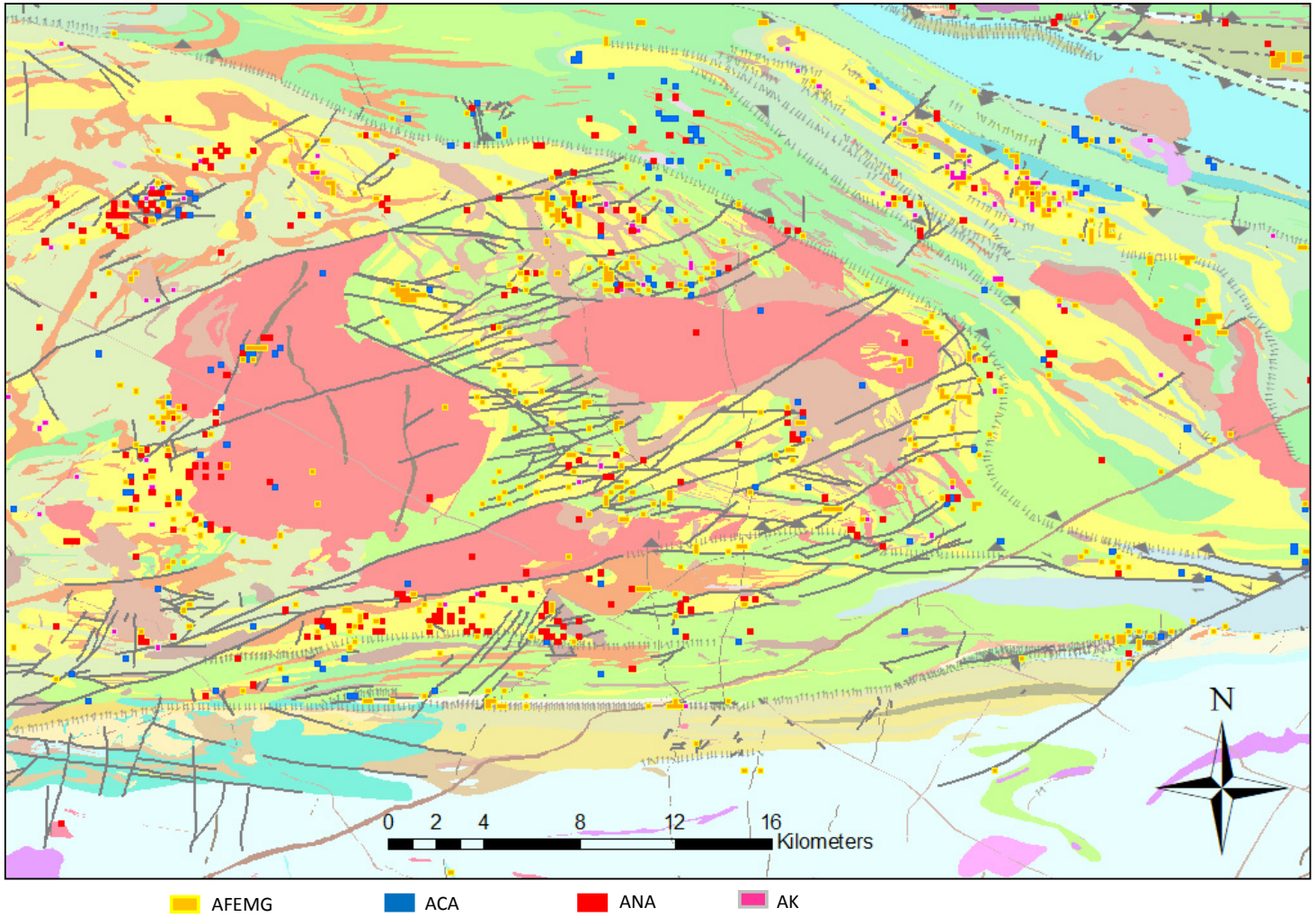


Figure 21 : Carte des échantillons altérés d'après le graphique de la figure 2

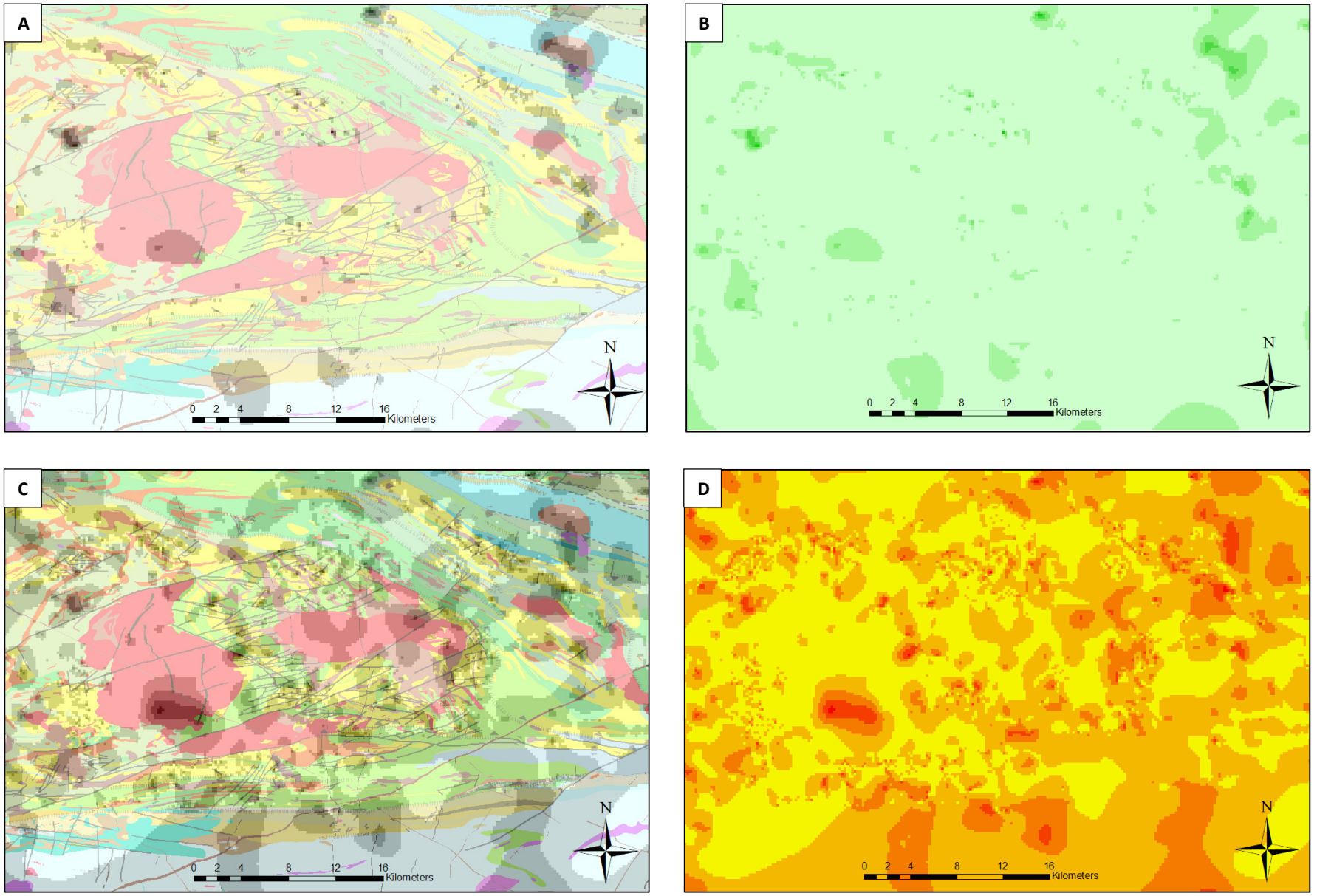


Figure 22 : Carte d'altération. A et B : à partir de l'indice Saturation Séricite. C et D : à partir de l'indice Séricite

Ainsi, bien qu'il paraisse judicieux de créer des cartes d'altérations afin de déterminer de nouvelles zones de prospection, cela semble malheureusement impossible et peu fiable dans le cas d'altérations hydrothermales. En effet, l'altération hydrothermale ayant lieu grâce au passage de fluides chauds dans la roche entrainant des processus de lessiviation, cela représente parfois une zone de 30 cm de diamètre. Une si petite surface d'altération ne sera pas cartographiée lors de campagnes d'échantillonnage à moins que la maille de mesure soit très petite. Par conséquent, en utilisant des outils d'interpolation basés sur les résultats d'analyse d'échantillons disséminés dans la zone d'étude, il est très probable de passer à côté de zones altérées. De plus, la distribution des fluides hydrothermaux étant relativement complexe, car contrôlée par les accidents structuraux, zones de faiblesse et porosité de la roche, il est impossible de pouvoir prévoir la position de nouvelles zones d'altération par rapport à la localisation de zones déjà cartographiées. Pour réaliser des cartes d'altérations, il faudrait dans connaitre parfaitement les éléments qui contrôlent la distribution des fluides et les cartographier avec précision, comme par exemple les failles, fractures, micro-fractures qui pourraient être des zones favorables au passage de fluides hydrothermaux. Cela demanderait un travail très important et très précis et, donc il ne pourrait être réalisé que sur une zone relativement concise, et non à l'échelle régionale comme c'était tout d'abord envisagé pour ces cartes d'altérations. Pour conclure, la réalisation de cartes d'altération comme aide à la détermination de nouvelles zones de prospection est très complexe et devrait être réalisée sur une zone concise et bien connue au niveau géologique et structurale afin de pouvoir déterminer la faisabilité de ce projet, ainsi que les résultats qui pourraient être obtenus à partir de cartes d'altération. Réaliser ces cartes sur une zone aussi vaste que le Blake River dans son ensemble me parait peu réaliste à ce stade.

3.3. Intégration des résultats 2D (cartes de potentiel et résultats de Lithomodeleur) avec les modèles 3D

Les résultats sous forme de cartes d'altération seront intégrés aux modèles réalisés afin de visualiser leur cohérence avec la réalité, et si besoin est, servir de contraintes au sein des modèles.

3.4. Évaluation de la résolution spatiale des levés géophysiques par modélisation directe et inverse

L'évaluation de la résolution spatiale consisterait à déterminer les meilleures caractéristiques pour réaliser le meilleur levé au meilleur coût. Pour cela, nous utiliserons différentes résolutions de levés géophysiques à partir desquels nous procéderons à la réalisation de modélisation directe et inverse.

En fonction des résultats, nous serons capables de caractériser suivant les propriétés du levé (espacement des points de mesures, hauteur de l'appareil, fréquence émise) et les propriétés des résultats (profondeur d'investigation maximum, tailles des structures observables, etc.). Ainsi, il nous sera possible de réaliser une base de données indiquant les caractéristiques que doit avoir le levé suivant l'objectif attendu.

3.5. Développement d'un protocole de modélisation 3D

La finalité de ce projet est le développement d'un protocole de modélisation 3D intégré prenant en compte les contraintes géologiques et géophysiques ainsi que les contraintes liées au changement d'échelle. Il regroupera tous les éléments clés de chaque échelle pour la mise en évidence de zones à fort potentiel minier. Ce protocole pourra alors servir d'outils lors des campagnes d'exploration minière, quelle que soit l'échelle, afin de cibler de nouvelles zones de prospection et faciliter la découverte de nouveaux gisements métallifères. Ce point n'est pas encore très développé, car il dépendra essentiellement des résultats obtenus en amont. Son contenu et sa mise en place seront développés tout au long de ce projet de doctorat.

IV. Conclusion

Durant mon année et demie de doctorat, j'ai effectué principalement des travaux de bibliographie. Ces travaux m'ont permis de comprendre la complexité de la géologie de l'Abitibi-Témiscamingue et plus particulièrement, de la région du Blake River. En effet, les terrains présents sont des terrains archéens, c'est-à-dire datés entre 4000 Ma et 2500 Ma. Il s'agit des terrains les plus anciens présents sur Terre. Ainsi, il est facilement envisageable de comprendre la complexité qui réside dans la compréhension de la mise en place de ces terrains et de leur structure en profondeur. En effet, de par leur âge, ces terrains ont subi beaucoup de processus et d'événements de déformation, que ce soit tectonique, métamorphique ou volcanique.

Concernant la réalisation de modèles géologiques 3D, il est important de noter la différence de difficultés entre la modélisation de terrains sédimentaires et de terrains volcaniques. Les terrains sédimentaires sont constitués de couches d'épaisseurs relativement constantes et visibles sur le terrain permettant la réalisation de logs stratigraphiques. Ces logs stratigraphiques sont des éléments majeurs

lors de l'extrapolation en profondeur des formations géologiques, puisqu'ils permettent de déterminer, à partir de la couche présente à l'affleurement, quelle est la succession de couches en profondeur. Cela est relativement plus difficile dans le cas de terrains volcaniques. Tout d'abord, il s'agit principalement de coulées, c'est-à-dire que l'épaisseur de la couche n'est pas constante dans l'espace. De plus, ils sont plus difficilement érodables, ce qui rend plus complexe l'observation de coupes géologiques sur le terrain. C'est pourquoi il est plus complexe de réaliser des logs stratigraphiques dans des terrains volcaniques. Ce problème se pose au sein du Blake River. Après discussion avec des géologues de terrains, j'ai appris qu'aucun log stratigraphique n'avait été réalisé dans la région, car la mise en place des différentes formations dans le temps est encore inconnue. De même, les divisions faites entre ces formations sont des divisions lithographiques et non stratigraphiques, ce qui signifie qu'elles sont réalisées en fonction de la nature de la roche et non de son âge. Or, comme mentionné précédemment, la modélisation géologique est basée sur l'interprétation en profondeur des couches, l'âge des formations augmentant avec la profondeur. C'est pourquoi le facteur temps est primordial lors de la réalisation d'un modèle géologique 3D relativement profond.

J'ai essayé de contourner ce problème majeur lors de la réalisation du modèle géologique 3D du gisement en construisant mon modèle à partir des forages disponibles. Ainsi, la première partie consisterait à relier entre eux les différents forages disponibles sur la zone d'étude, puis dans un second temps, affiner la géométrie des couches entre les forages à l'aide d'outils géophysiques comme la gravimétrie ou le magnétisme. Cependant, cela s'est révélé plus complexe que prévu initialement à cause de la présence de très nombreuses alternances de couches. Sans une datation précise des différentes couches, il est très difficile de savoir si la couche d'andésite située à 70cm de profondeur correspond dans le forage voisin à la couche d'andésite située à 30 ou à 120cm, par exemple. Ainsi, malgré un traitement des données afin d'enlever les couches inférieures à 10cm (c'est-à-dire que je considère comme superficielles et non représentatives, ainsi que non modélisables), je n'ai pas été capable de relier les forages afin de réaliser un modèle géologique 3D représentatif de la réalité.

L'absence de datation sur les roches ou les formations, et par conséquent, l'absence de log stratigraphique est un problème majeur pour la réalisation de modèles géologiques 3D. Il était aussi convenu que soit réalisé au sein de ce doctorat trois modèles géologiques (et géophysiques) à 3 échelles différentes (gisement, district et région). Cependant, au vu des difficultés rencontrées et des données disponibles, je pense que la réalisation d'un modèle géologique et géophysique à une seule échelle consisterait déjà un travail de doctorat important. L'application de cette méthode à d'autres

échelles pourrait ensuite être étudiée et amenée, si besoin, à de légères modifications de la méthode proposée.

Un autre volet de ce doctorat portait sur la réalisation de cartes d'altérations. La mise en place de gisements, tels que les VMS par exemple, est générée principalement par le passage de fluides chauds entrainant une remobilisation ainsi qu'une accumulation localisée de certains minéraux. Ces fluides chauds sont également à l'origine de la présence de zones d'altérations autour de ces gisements. Ainsi notre hypothèse de travail était qu'en localisant des zones d'altérations réelles ou supposées, nous puissions découvrir de nouveaux gisements en profondeur. Cependant, plusieurs obstacles ont été rencontrés lors de la réalisation de ces cartes. Le premier problème provient de ma formation. En effet, la présence d'altération dans une roche est particulièrement visible en étudiant les résultats fournis par les analyses chimiques de l'échantillon. Or, la géochimie n'étant pas mon domaine de prédilection, ma lecture des résultats d'analyse était très sommaire. Pour combler cette lacune, j'ai entré l'ensemble des résultats à l'intérieur du logiciel Lithomodeleur afin de pouvoir extraire les échantillons de roches altérées d'après différents graphiques et calcul d'indices. Les cartes résultant de ces analyses ne sont malheureusement que peu utiles. Tout d'abord, l'altération hydrothermale forme des auréoles de tailles diverses et variées en fonction de différentes caractéristiques de la roche comme sa porosité, les microfractures ou failles la traversant. Ainsi, en surface, l'altération peut parfois avoir un diamètre d'à peine 30 cm. Or, la maille des échantillons prélevés est souvent plus importante, ce qui signifie qu'il y a un risque de passer à côté. De plus, les cartes d'altération obtenues tiennent compte uniquement des données d'analyses chimiques. Afin de réaliser une carte plus réaliste, il serait intéressant de réaliser dans un premier temps une carte de porosité, puis une carte tectonique avec les accidents majeurs et secondaires et enfin une carte des microfractures. L'assemblage de ces diverses cartes avec celles issues des analyses chimiques donnerait, de mon point de vue, des résultats plus intéressants et plus réalistes. Cependant, la réalisation de telles cartes prend du temps et encore une fois, il serait intéressant de tester d'abord la faisabilité et la pertinence de la réalisation et de l'assemblage de ces cartes sur une petite surface avant de l'extrapoler à des zones plus conséquentes comme l'échelle du Blake River.

Bibliographie

Apel, M. «A 3D geological information system framework.» *Geophysical Research Abstracts* 7 (2005): 05732.

Astic, T. *Modélisation 3D et interprétation géologique du flanc nord du camp minier de Matagami par intégration de données et inversions géophysiques.* Montréal: Ecole Polytechnique, 2012.

Ayer, J. Aet al. *Ayer, J. A., & Ontario Geological Survey. (2005). Overview of results from the greenstone architecture project: discover Abitibi initiative.* Ontario Geological Survey, 2005.

Baragar, W. R. A. «Major-element geochemistry of the Noranda volcanic belt, Quebec-Ontario.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 5, n° 4 (1968): 773-790.

Barrett, T. J, S Cattalani, et W. H MacLean. «Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. I. The Horne mine.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 28, n° 4 (1991): 465-488.

Bédard, K. *La construction de modèles géologiques 3d à l'ère de la normalisation.* Québec: Université Laval, 2006.

Calcagno, P, J.P Chilès, G Courrioux, et A Guillen. «Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules.» *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171 (2008): 147-157.

Cattalani, S, T. J Barrett, W. H MacLean, L Hoy, C Hubert, et J. F Fox. *Métallogènese des gisements Horne et Quemont.* Report ET 90-07, Ministère de l'Energie et des Ressources du Québec, 1993.

Chilès, J.P, C Aug, A Guillen, et T Lees. «Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D from structural data : the Potential-Field method.» *Proceedings of international symposium on orebody modelling and strategic mine planning, Perth, Australia* 22 (November 2004): 24.

Chouteau, M, et P Shamsipour. «3D magnetic inversion of 3D magnetic dataset of the Canadian Malartic mine.» *International Workshop and Gravity, Electrical & Magnetic Methods and their Applications.* Chenghu, China: Society of Exploration Geophysicists and Chinese Geophysical Society, 2015.

Chown, E. H, R Daigneault, W Mueller, et J. K Mortensen. «Tectonic evolution of the northern volcanic zone, Abitibi belt, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 29, n° 10 (1992): 2211-2225.

Cowan, E.Jet al. «Cowan, E. J., Beatson, R. K., Ross, H. J., Fright, W. R., McLennan, T. J., Evans, T. R., ... & Oshust, P. A. (2003, November). Practical implicit geological modelling.» *Fifth International Mining Geology Conference*, 2003: 17-19.

Darling, R, et G. G Suffel. «Evidence for post-ore metadiabase at the Horne mine, Noranda, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 9 (1969): 781.

Davis, D. W. «U–Pb geochronology of Archean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics.» *Precambiran Research* 115, n° 1 (2002): 97-117.

de Rosen-Spence, A. F. *Stratigraphy, development and petrogenesis of the central Noranda volcanic pile, Noranda, Quebec.* Doctorat dissertation, Toronto: University of Toronto, 1976.

Dimroth, E, L Imreh, M Rocheleau, et N Goulet. «Evolution of the south-central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part I: Stratigraphy and paleogeographic model.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 19, n° 9 (1982): 1729-1758.

Dimroth, E, L Imreh, N Goulet, et M Rocheleau. «Evolution of the south-central segment of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part III: Plutonic and metamorphic evolution and geotectonic model.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, n° 9 (1983): 1374-1388.

Dion, C, et P Rhéaume. *Stratigraphie de la partie occidentale du Groupe de Blake River.* Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (Québec), 2007, 29.

Ellis, R.G, et D.W Oldenburg. «Applied geophysical inversion.» *Geophysical Journal International* 116, n° 1 (1994): 5-11.

Fallara, F, M Legault, et O Rabeau. «3D Integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada) - Techiques and applications.» *Exploration and Mining Geology* 15, n° 1-2 (2006): 27-43.

Fisher, D. F. *The Origin of the No.5 Zone, Horne Mine, Noranda, Quebec.* M.Sc thesis, London: University of Western Ontario, 1970.

Fullagar, P.K, et G.A Pears. «Towards Geologically Realistic Inversion.» *Proceeding of Exploration* 7 (2007): 444-460.

Galley, A. G, M. D Hannington, et I. R Jonasson. «Volcanogenic massive sulphide deposits.» Doctorat dissertation, 2007.

Gélinas, L, C Brooks, G Perrault, J Carignan, P Trudel, et F Grasso. «Chemostratigraphic divisions within the Abitibi volcanic belt, Rouyn-Noranda district, Quebec.» *Geological Association of Canada, Special Paper* 16 (1977): 265-295.

Gélinas, L, P Trudel, et C Hubert. «Chemostratigraphic division of the Blake River Group, Rouyn–Noranda area, Abitibi, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 21, n° 2 (1984): 220-231.

Gibson, H. L. *The Mine Sequence of the Central Noranda Volcanic Complex: Geology, Alteration Massive Sulphide Deposits and Volcanological Reconstruction.* Doctorat dissertation, University of Carleton, 1989.

Gibson, H. L, D. J Kerr, et S Cattalani. «The Horne mine: Geology, history, influence on genetic models, and a comparison to the Kidd Creek mine.» *Exploration and Mining Geology* 9, n° 2 (2000): 91-111.

Gibson, H. L, et D. H Watkinson. «Volcanogenic massive sulphide deposits of the Noranda cauldron and shield volcano, Quebec.» *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 1990: 119-132.

Gibson, H. L, et D. J Kerr. «A comparison between the Horne massive sulfide deposit and smaller intracauldron deposits of the Mine Sequence, Noranda, Quebec.» *Geological Society of America Annual Meeting.* 1990. A15.

Gibson, H. L, R. L Allen, G Riverin, et T. E Lane. «The VMS Model: Advances and Application to Exploration Targeting.» *5th Decennial International Conference on Mineral Exploration, Proceedings.* 2007. 713-730.

Gilmore, P. C. «The origin of massive sulfide mineralization of the Noranda District, northwestern Quebec.» *Proceedings, Geological Association of Canada* 8 (1965): 63-81.

Goldie, R. «Consanguineous Archaean intrusive and extrusive rocks, Noranda, Quebec: Chemical similarities and differences.» *Precambrian Research* 9, n° 3-4 (1979): 275-287.

Goldie, R. «Magma mixing in the Flavrian pluton, Noranda area, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 15, n° 1 (1978): 132-144.

Goodwin, A. M. «Archean volcanism in Superior Province, Canadian Shield. Volcanic regimes in Canada.» *Geological Association of Canada, Special Paper* 16 (1977): 205-241.

Goutier, J. *Géologie de la région de Destor:(32D/07-200-0201).* Le Service, Ministère de l'énergie et des ressources., 1997.

Guillen, A, P Calcagno, G Courrioux, A Joly, et P Ledru. «Geological modelling from field data and geological knowledge: part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion.» *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171, n° 1 (2008): 158-169.

Hannington, M. D, A. G Galley, P. M Herzig, et S Petersen. «Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits.» *Proc Ocean Drill Program Sci Results* 158 (1998): 389-415.

Hannington, M. D, F Santaguida, I. M Kjarsgaard, et L. M Cathles. «Regional-scale hydrothermal alteration in the Central Blake River Group, western Abitibi subprovince, Canada: implications for VMS prospectivity.» *Mineralium Deposita* 38, n° 4 (2003): 393-422.

Hodge, H. J. «Horne Mine.» *Canadian Institue of Mining and Metallurgy*, 1967: 40-45.

Hubert, C, P Trudel, et L Gélinas. «Archean wrench fault tectonics and structural evolution of the Blake River Group, Abitibi Belt, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 21, n° 9 (1984): 1024-1032.

Jessel, M. «Three-dimensional geological modelling of potential-field data.» *Computers & Geosciences* 27, n° 4 (2001): 455-465.

Jolly, W. T. «Development and degradation of Archean lavas, Abitibi area, Canada, in light of major element geochemistry. .» *Journal of Petrology* 21, n° 2 (1980): 323-363.

Kaufmann, O, et T Martin. «3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines.» *Computers & Geosciences* 34, n° 3 (2008): 278-290.

Kennedy, L. P. *The geology and geochemistry of the Archean Flavrian pluton, Noranda, Quebec.* Unpublised Ph. D, London: University of Western Ontario, 1985.

Kerr, D. J, et H. L Gibson. «A comparison of the Horne volcanogenic massive sulfide deposit and intracauldron deposits of the Mine Sequence, Noranda, Quebec.» *Economic Geology* 88, n° 6 (1993): 1419-1442.

Kerr, D. J, et R Mason. «A re-appraisal of the geology and ore deposits of the Horne mine complex at Rouyn-Noranda, Quebec.» *Canadian Insitute of Mining and Metallurgy*, 1990: 153-165.

Lachance, B, K Bédard, J Pouliot, et D Kirkwood. «La modélisation 3D: Application à la Géologie.» *Colloque national Géomatique de l'ACSG-CIG.* Montréal, 2004. 15.

Lafrance, B, et C Dion. *Synthèse de la partie est du groupe de Blake River, phase 1: secteur à l'est de la faille du ruisseau Davidson (32D/07 SE) (p. 14).* Ressources naturelles, faune et parcs., 2004.

Lafrance, B, J Moorhead, et D Davis. *Cadre géologique du camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde.* Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune et des Parcs du Québec, 2003, 43.

Lajaunie, C, G Courrioux, et L Manuel. «Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation.» *Mathematical Geology* 29, n° 4 (1997): 571-584.

Le Melinaire, P. *Modélisation de relations géométriques par la méthode DSI: application à la géologie.* (Doctoral dissertation), 1992.

Li, Yaoguo, et Douglas, W Oldenburg. «3D Inversion of gravity data.» *Geophysics* 63, n° 1 (1998): 109-119.

Li, Yaoguo, et Douglas, W Oldenburg. «3D Inversion of magnetic data.» *Geophysics* 61, n° 2 (1996): 394-408.

Lichtblau, A. *Stratigraphy and facies at the south margin of the Archean Noranda Caldera.* Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi, 1989.

Luo, Z.Q, L Xiao-ming, S Jia-hong, W Ya-bin, et L Wang-ping. «Deposit 3D modeling and application.» *Journal of Central South University of Technology* 14, n° 2 (2007): 225-229.

MacLean, W. H, et L. D Hoy. «Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne mine, Noranda, Quebec.» *Economic Geology* 86, n° 3 (1991): 506-528.

Mallet, J.L. «Discrete smooth interpolation in geometric modelling.» *Computer-aided design* 24, n° 4 (1992): 178-191.

Mallet, J.L. «Gocad : A computer aided design program for geological applications.» Dans *In Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*, édité par A. K Turner, 123-141. Springer Netherlands, 1992.

Marquis, P, A. C Brown, C Hubert, et D. M Rigg. «Progressive alteration associated with auriferous massive sulfide bodies at the Dumagami Mine, Abitibi greenstone belt, Quebec.» *Economic Geology* 85, n° 4 (1990): 746-764.

Martelet, Get al. «Integrated 3D geophysical and geological modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtoceaux area (south Brittany, France).» *Tectonophysics* 382, n° 1 (2004): 117-128.

McGaughey, J, et B Milkereit. «Geological models, rock properties, and the 3D inversion of geophysical data.» *Proceedings of exploration* 7 (2007): 473-483.

McNicoll, Vet al. «U-Pb Geochronology of the Blake River Group, Abitibi Greenstone Belt, Quebec, and Implications for Base Metal Exploration.» *Economic Geology* 109, n° 1 (2014): 27-59.

Mercier-Langevin, P, B Dubé, M. D Hannington, D. W Davis, B Lafrance, et G Gosselin. «The LaRonde Penna Au-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Abitibi

greenstone belt, Quebec: Part I. Geology and geochronology.» *Economic Geology* 102, n° 4 (2007): 585-609.

Mercier-Langevin, P, B Dubé, M. D Hannington, D. W Davis, et B Lafrance. *Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Hannington, M. D., Davis, D. W., & Lafrance, B. (2003). Contexte géologique et structural des sulfures massifs volcanogènes aurifères du gisement LaRonde. Abitibi.* Ministère des ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec, 2003, 47.

Monecke, T, H Gibson, B Dubé, J Laurin, M. D Hannington, et L Martin. «Geology and volcanic setting of the Horne deposit. Rouyn-Noranda, Quebec: Initial results of a new research project.» *Geological Survey of Canada Current Research* 9 (2008): 16.

Mookherjee, A, et G. G Suffel. «Massive sulfide-late diabase relationships, Horne mine, Quebec : Genetic and chronologic implications.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 5 (1968): 421-432.

Oldenburg, D.W. «The inversion and interpretation of gravity anomalies.» *Geophysics* 39, n° 4 (1974): 526-536.

Oldenburg, D.W, et D.A Pratt. «Geophysical Inversion for Mineral Exploration - A decade of progress in theory and practice.» 2007.

Oldenburg, D.W, et Y Li. «Inversion for applied geophysics: A tutorial.» *Near-surface geophysics: SEG*, 2005: 89-150.

Pearson, V, et R Daigneault. «An Archean megacaldera complex: the Blake River Group, Abitibi greenstone belt.» *Precambrian Research* 168, n° 1 (2009): 66-82.

Péloquin, A. S, R Potvin, S Paradis, M. R Laflèche, P Verpaelst, et H. L Gibson. «The Blake River Group, Rouyn-Noranda area, Quebec: A stratigraphic synthesis.» *The northwestern Quebec polymetallic belt : a summary of* 60 (1990): 107-118.

Portniaguine, O, et M.S Zhdanov. «Focusing geophysical inversion images.» *Geophysics* 64, n° 3 (1999): 874-887.

Powell, W. G, D. M Carmichael, et C. J Hodgson. «Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 32, n° 6 (1995): 787-805.

Price, P. «Horne mine. Structural Geology of Canadian Ore Deposits.» Édité par RPD Graham. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy* Jubilee Volume (1948): 763-772.

Price, P. *The geology and ore deposits of the Horne Mine, Noranda, Quebec.* Doctorat dissertation, Montreal: McGill University Librairies, 1933.

Rabeau, O, M Legault, A Cheilletz, M Jébrak, J.J Royer, et L.Z Cheng. «Gold potential of a hidden Archean fault zone: the case of the Cadillac–Larder Lake Fault.» *Exploration and Mining Geology* 19, n° 3-4 (2010): 99-116.

Rabeau, O, M Legault, L.Z Cheng, R Marquis, et D Bois. *Cartographie 3D et potentiel aurifère du segment ouest de la partie québécoise de la faille de Cadillac - Part1*. Montréal: DIVEX, 2006.

Ringrose, P.S, A.W Martinius, et J Alvestad. «Multiscale geological reservoir modelling in practice.» *Geological Society, London, Special Publications* 309, n° 1 (2008): 123-134.

Roscoe, S. M. «Geochemical and isotopic studies, Noranda and Matagami areas.» *Canadian Institute of Mining and Metallurgy* Bulletin 58 (1965): 279-285.

Sarane Sterckx, P. S. R, et J Goutier. «Géochimie des roches volcaniques archéennes du Groupe de Blake River, Sous-province de l'Abitibi, Québec.» Rapport préliminaire, 2013.

Savoie, A, P Trudel, P Sauvé, L Hoy, et K Lao. *Géologie de la mine Doyon (région de Cadillac).* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 1991, 80.

Shamsipour, P. *Three-dimensional stochastic inversion of gravity data: application to gravity data from the Matagami region, Quebec.* Natural Resources Canada, 2010.

Shamsipour, P, D Marcotte, M Chouteau, et P Keating. «3D stochastic inversion of gravity data using cokriging and cosimulation.» *Geophysics* 75, n° 1 (2010): I1-I10.

Sinclair, W. D. «A volcanic origin for the No.5 zone of the Horne mine, Noranda, Quebec.» *Economic Geology* 30 (1971): 1225-1231.

Sinclair, W. D. *Geology of the No. 5 Zone, Noranda, Quebec, Canada.* M.Sc thesis, Madison: University of Wisconsin, 1970.

Spence, C. D, et A. F de Rosen-Spence. «The place of sulfide mineralization in the volcanic sequence at Noranda, Quebec.» *Economic Geology* 70, n° 1 (1975): 90-101.

Stone, W. E. «Archean volcanism and sedimentation in the Bousquet gold district, Abitibi greenstone belt, Quebec: Implications for stratigraphy and gold concentration.» *Geological Society of America Bulletin* 102, n° 1 (1990): 147-158.

Suffel, G. G. «Relations of later gabbro to sulphides at the Horne Mine, Noranda, Quebec.» *Economic Geology* 30, n° 8 (1935): 905-915.

Tourigny, C, C Hubert, A. C Brown, et R Crépeau. «Structural control on gold mineralization at the Bousquet Mine, Abitibi, Quebec.» *Canadian Journal of Earth Sciences* 26 (1989): 157-175.

Tourigny, C, D Doucet, et A Bourget. «Geology of Bousquet 2 mine : An example of a deformed, gold-bearing polymetallic sulfide deposit.» *Economic Geology* 88 (1993): 1578-1597.

Trépanier S. Optimisation des données de till pour l'exploration. Rapport du projet 2011-05 du CONSOREM. 80p.

Trépanier, S., Mathieu, L., R. Daigneault 2015. CONSONORM_LG: new normative minerals and alteration indexes for low-grade metamorphic rocks. Journal of metamorphic geology Economic Geology, Vol. 110, No. 8, p. 2127-2138.

Trépanier, S., Mathieu, L. Daigneault, R., Faure, S. 2016. Precursors predicted by artificial neural networks for mass balance calculations: quantifying hydrothermal alteration in volcanic rocks. Computer and Geosciences, 89, 32-43.

Trudel, P. *Trudel, P. (1979). Le volcanisme archéen et la géologie structurale de la région de Cléricy, Abitibi, Québec.* Doctorat dissertaion, Montréal: Ecole Polytechnique, 1979.

Turner, A.K. *Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems.* Springer Science & Business Media, 1992.

Wang, Get al. «3D geological modeling based on gravitational and magnetic data inversion in the Luanchuan ore region, Henan Province, China.» *Journal of Applied Geophysics* 80 (2012): 1-11.

Wilson, M. E. «Noranda district, Quebec.» *Geological Survey of Canada* Memoir 229 (1941): 162.