Rapport technique sur les levés magnétométrique et électromagnétique (FDEM) réalisés en février 2017 sur la propriété Ste-Clotilde

(Ste-Clotilde, Qc).

Détenu par

Cartogeographix inc.

RAPPORT

Préparé par :

Marc Richer-LaFlèche, Ph.D., géo

INRS-ETE

25 mars 2017

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2017 Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-907-4 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018 Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018

Sommaire

Ce rapport présente les résultats d'un levé géophysique, réalisé en février 2017, sur la propriété Ste-Clotilde située dans la municipalité de Ste-Clotilde dans la MRC Les-Jardinsde-Napierville (Montérégie). L'étude réalisée pour la compagnie Cartogeographix consiste en un levé magnétométrique au sol (GSM-19) et un levé électromagnétique en domaine fréquentiel (Promis-10). Ces levés ont été réalisés le long d'un système de 14 lignes parallèles orientées NO-SE. Ces levés ont été suivi d'un levé d'imagerie tomographique géoélectrique (résistivité et chargeabilité électrique) réalisé le long d'une ligne afin d'évaluer la pertinence de cette méthode pour des travaux ultérieurs sur la propriété Ste-Clotilde. Dans l'ensemble, les données du champ magnétique total montrent une augmentation des valeurs vers le nord et le nord-ouest du périmètre du levé. Le secteur de l'étang de castor montre des valeurs de champ magnétique légèrement plus élevées suggérant la présence de sols et ou de sédiments caractérisés par de de plus hautes valeurs de susceptibilité magnétique. Les grès siliceux, affleurant ou sub-affleurant, montrent de faibles valeurs de champ magnétique total. Les données acquises sur la propriété montrent de plus forts contrastes magnétiques et ce malgré la nature relativement peu magnétique des unités de grès siliceux du Groupe de Postdam. La majorité des perturbations magnétiques observées résultent de sources anthropiques variablement distribuées sur le terrain (carcasse de voiture, chaloupe, clôture, déchets métalliques, tuyauterie, pneus). Les données magnétiques de l'extrémité Est du périmètre du levé sont sévèrement affectées en bordure de l'ancien chemin de fer. Des matériaux métalliques sont probablement enfouis sous la piste cyclable (vtt) et ou en bordure de l'ancien chemin de fer. Les données de résistivité électrique apparente, mesurées par le système Promis-10 (électromagnétisme fréquentiel), montrent de fortes variabilités en fonction de la fréquence d'induction utilisée. Pour les hautes fréquences d'induction (signal peu pénétratif), les données sont fortement influencées par la présence d'eau de surface, de sols et sédiments et par la présence de roc affleurant ou sub-affleurant très résistif. Les données pour les plus basses fréquences d'induction suggèrent la présence d'un socle rocheux résistif en profondeur. Ceci est compatible avec l'observation de strates subhorizontales des grès siliceux du Postdam dans ce secteur de la propriété. La tendance à l'homogénéisation de valeurs plus résistives en fonction de la diminution de la fréquence d'induction (et donc de la profondeur d'investigation), suggère la présence d'un roc de moins en moins fracturé en profondeur. Ceci est compatible avec ce qui est observé dans la carrière Sicotte située à 200m de la limite NE du périmètre du levé. L'imagerie tomographique géoélectrique obtenue le long de la ligne 7 démontre qu'il est possible de cartographier avec précision l'interface entre le roc frais et le roc altéré de subsurface et de localiser des domaines de grès plus impurs (haute chargeabilité). Une utilisation systématique de cette méthode, avec quelques de forage de validation, permettrait d'optimiser les travaux de mise en valeur du site dans le but d'une éventuelle opération minière (priorisation des secteurs d'extraction de quartzite de qualité).

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	2
Table des matières	3
Table des figures	5
1. Introduction	8
1.1-Localisation 1.2-Géologie 1.3-Bref historique	8 10 14
2. Données statistiques	17
2.1-Personnel affecté à la réalisation du levé géophysique sur la propriété Ste-Clotilde	17
2.2-Type de levés géophysiques réalisés en février 2017 sur la propriété Ste-Clotilde	17
2.2.1 Levé magnétométrique (GSM-19)	17
2.2.2. Levé électromagnétique (Promis-10)	17
2.2.3. Levé de résistivité et de chargeabilité électrique en mode d'imagerie tomographique (ABEM Terrameter-LS)	18
3. Méthodologie	18
3.1 Levé magnétométrique (GSM-19)	18
3.2 Levé de résistivité électrique apparente par induction électromagnétique en domaine fréquentiel (Promis-10)	22
3.2.1 Système Promis-10 (Iris Instruments)	24
3.3 Paramètres d'acquisition du levé de tomographie géoélectrique ABEM Terrameter-LS réalisé à Ste-Clotilde	26
4. Résultats et discussion	28
4.1 Présentation des données du levé magnétométrique réalisé sur la propriété Ste-Clotilde	28

4.1.1 Données d'élévation	28	
4.1.2 Dispositif (réseau de ligne)	29	
4.1.3 Station de base et corrections des données	32	
4.1.4 Données magnétiques corrigées	33	
4.1.5. Données du champ magnétique total corrigées par la méthode de réduction aux pôles	34	
4.1.6. Données du gradient magnétique mesuré	36	
4.1.7. Données de la dérivée verticale première du champ magnétique		
4.1.8. Données du signal analytique calculées à partir des données du champ magnétique total corrigées pour la variation diurne.		
4.2 Présentation des données de résistivité électrique apparente du levé d'induction électromagnétique fréquentiel (Promis-10)	40	
4.3 Tomographie géoélectrique (ABEM Terrameter LS)	45	
5. Conclusion	46	
6. Références	48	
7. Remerciements	49	
Annexe 1		
-1 a	50	
-1 b	51	
-1 c	52	
-1 d	53	
-1 e	54	

TABLE DES FIGURES

Figure 1 . Localisation de la propriété de silice Ste-Clotilde situé dans la Seigneurie de Beauharnois-Villechauve.	8
Figure 2. Localisation de la propriété Ste-Clotilde : carte interactive du MERN-Mines au 29 août 2016.	9
Figure 3 . Stratigraphie régionale proposée par Globensky (1986,1987). L'étoile rouge correspond à la position stratigraphique approximative des orthoquartzites de la propriété Ste-Clotilde.	11
Figure 4 . Photographies de terrain montrant l'unité d'orthoquartzites affleurant en de nombreux endroits sur la propriété Ste-Clotilde. A et D) laminations entrecroisées, B et C) impuretés carbonatées (?) dans le grès. Photos prises en février 2017.	12
Figure 5 . Cartes modifiées du gradient vertical (champ magnétique total) (A) et du champ magnétique total (B) des données aéromagnétiques du MERN du Québec. Données provenant du site de cartographie interactive du MERN (WEB).	13
Figure 6. Carte de localisation des forages réalisés sur la propriété Ste-Clotilde selon les données disponibles, au 30 août 2016, sur le site WEB du MERN du Québec (carte interactive). Le plan B montre la position des forages sur un fond d'image satellite.	16
FIGURE 7. Variabilité des données du champ magnétique total mesurées à la station de base magnétique de la propriété Ste-Clotilde. La qualité des données est indiquée par le facteur de qualité exprimé en %. Données du 18, 21, 23 et 24 février 2017.	20
FIGURE 8. Variabilité des données du champ magnétique total mesurées à la station de base magnétique de la propriété Ste-Clotilde. La qualité des données est indiquée par le facteur de qualité exprimé en %. Données du 27 et 28 février 2017.	21
Figure 9. Variation de la pénétration verticale (volume d'intégration) en fonction de la fréquence d'induction des systèmes électromagnétiques en domaine de fréquence. Notez que les basses fréquences sont beaucoup plus pénétratives que les hautes fréquences.	23
Figure 10. Dispositif d'induction électromagnétique avec boucles d'émission (émetteur Tx) et de réception (récepteur Rx) montrant le processus de pénétration du champ électromagnétique dans le sol et la génération de courants et champs magnétiques secondaires enregistrés par le récepteur.	24
Figure 11. Système d'induction électromagnétique Promis-10 d'Iris Instruments (Photo : Iris Instruments).	25
Figure 12. Principales constituantes de l'émetteur et console du récepteur du système Promis-10.	26

Figure 13 . Carte d'élévation (en mètre) du périmètre du levé géophysique de Ste- Clotilde. Les points noirs sur la carte correspondent aux données magnétiques et GPS mesurées conjointement avec le DGPS Trimble et utilisant des données de correction	
satellitaire Omnistar.	28
Fig. 14. Carte de localisation du périmètre du levé géophysique et des lignes provenant de la coupe de ligne de l'automne 2016.	29
Figure 15. Photographies de terrain montrant la présence de déchets et de différentes Structures métalliques sur la propriété Ste-Clotilde. A) pièges à homard B) pompe de piscine C) chaloupe D) barils de 45 gallons E) déchets divers F) bâtiment en tôle (ancien entrepôt d'explosif) G) boite de camion H) déchets divers I) clôture métallique.	31
Fig. 16. Inondation du terrain lors des levés géophysiques de février 2017. C et D) terrain inondé. A) champ de quenouilles en terrain marécageux, B) sentier provincial de VTT et motoneige.	32
Figure 17. Carte des données corrigées du champ magnétique total et interpolées par krigeage pour le périmètre du réseau de ligne de la propriété Ste-Clotilde.	34
Figure 18. Carte des données du champ magnétique total corrigées pour la variation diurne et la réduction aux pôles.	35
Figure 19. Carte des données du gradient magnétique mesurées par les deux senseurs magnétiques du système GSM-19. Les données gradiométriques permettent de localiser rapidement les principales anomalies magnétiques dans le périmètre du levé.	36
Figure 20. Carte des données de la dérivée verticale première du champ magnétique total corrigées par la méthode de réduction aux pôles.	38
Figure 21 . Carte des valeurs du signal analytique calculées à partir des dérivées en X, Y et Z du champ magnétique total corrigé pour la dérive diurne.	39
Figure 22 . Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 56320Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.	40
Figure 23 . Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 3520Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.	42
Figure 24 . Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 880Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.	43
Figure 25 . Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 220Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.	44

Figure 26. Sections tomographiques géoélectriques de la résistivité électrique et de la chargeabilité électrique (polarisation induite) de la ligne 7 du périmètre du levé géophysique de Ste-Clotilde. Orientation de la section du SE vers le NO. Longueur de 400m et espacement des électrodes de 5m.

1-INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats d'une étude géophysique réalisée sur la propriété Ste-Clotilde. L'étude fait partie d'une série de travaux de recherche réalisés par l'INRS sur des gîtes de silice du Québec (ex. Zec des Martes de Charlevoix, Roncevaux, Matapédia). Dans le cas présent, l'étude porte principalement sur la réalisation d'un levé magnétométrique et électromagnétique fréquentiel dans le but d'améliorer la compréhension de la géologie du gîte de silice de Ste-Clotide.

1.1-LOCALIS ATION

La propriété Ste-Clotilde est localisée dans la Vallée-du-Haut-Saint-Laurent à environ 52 km de Montréal et à 3 km du village de Ste-Clotilde et à seulement 10 km de la frontière avec l'état de New-York. Elle est située dans la région administrative de la Montérégie et dans la MRC Les-Jardins-de-Napierville (**Fig. 1**). La propriété, située sur des terres privées, est incluse dans la carte topographique NTS 31H/04 (1 :50 000).



Figure 1. Localisation de la propriété de silice Ste-Clotilde située dans la Seigneurie de Beauharnois-Villechauve.

La propriété Ste-Clotilde est constituée de 16 claims (**Fig. 2**). Ces derniers sont situés dans un secteur essentiellement forestier ou agro-forestier accessible par des chemins de rang publics. Le secteur est accessible en suivant la route 205 vers le sud à partir du village de Ste-Clotilde.



Figure 2. Localisation de la propriété Ste-Clotilde : carte interactive du MERN-Mines au 29 août 2016.

1.2-GÉOLOGIE

La propriété Ste-Clotilde est située dans les roches sédimentaires du Groupe de Postdam et plus spécifiquement dans la Formation de Cairnside constituée surtout de grès quartzeux (orthoquartzites) (Fig. 2) (Globensky, 1986; 1987). Les roches sédimentaires de la Formation de Cairnside marquent la partie supérieure du Groupe de Postdam au Québec (Cambrien supérieur) (Fig. 3). Les roches sont majoritairement constituées d'orthoquartzites relativement pures passant localement à des unités de grès siliceux avec ciments dolomitiques et à de minces horizons de roches dolomitiques vers la partie supérieure de la Formation de Cairnside. Sur la propriété Ste-Clotilde, les affleurements d'orthoquartzites montrent des structures sédimentaires (laminations entrecroisées, rides de plage) témoignant d'un environnement sédimentaire relativement peu profond (faible bathymétrie) (Fig. 4a et d). Les roches du Groupe de Postdam sont surmontées stratigraphiquement par les roches sédimentaires de la Formation de Theresa du Groupe de Beekmantown (Ordovicien inférieur). Ces dernières sont constituées de grès quartzeux, de grès dolomitiques et de dolomies arénacées (Clarck, 1972; Globensky, 1986; 1987).

Le degré de déformation des roches du secteur de la propriété Ste-Clotilde est faible et la stratigraphie est essentiellement sub-horizontale (**Pelletier, 2002**). Localement, la stratigraphie est légèrement ondulée en raison de la présence d'une structure anticlinale régionale. L'axe de ce pli plonge faiblement vers le nord-est. Des failles, orientées Nord-Est / Sud-Ouest, recoupent les roches sédimentaires de la région de Ste-Clotilde. La faille la plus importante, située à l'Ouest, est la faille normale de Havelock. En plus d'affecter le drainage hydrographique local, cette faille est localement associée à la présence de brèches tectoniques. Une faille présumée serait aussi présente à l'est de la propriété Ste-Clotilde. Le site internet du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec indique l'absence de données pertinentes pour caractériser la nature et la position exacte de cette faille. Les roches sédimentaires de la propriété Ste-Clotilde et de la carrière de silice adjacente montrent localement une fracturation bien organisée avec des espacements de 10 à 50 cm entre les fractures. Certains plans de fracture sont oxydés (goethite, hématite) en raison

de la circulation d'eaux souterraines et de l'interacton avec les minéraux primaires des quartzites.

La **figure 5** présente les cartes du gradient vertical (**5a**) et du champ magnétique total (**5b**) provenant de données aéromagnétiques du MERN du Québec. La carte du gradient montre bien la présence de l'anticlinal régional qui affecte localement les roches des Groupes de Postdam et de Beekmantown. L'augmentation des valeurs du champ magnétique total en direction du Nord-Ouest de la carte de la **figure 5b** pourrait s'expliquer par un amincissement de la séquence de roches sédimentaires et la présence des roches précambriennes (socle plus magnétique) à plus faibles profondeurs.



Figure 3. Stratigraphie régionale proposée par Globensky (1986,1987). L'étoile rouge correspond à la position stratigraphique approximative des orthoquartzites de la propriété Ste-Clotilde.



Figure 4. Photographies de terrain montrant l'unité d'orthoquartzites affleurant en de nombreux endroits sur la propriété Ste-Clotilde. A et D) laminations entrecroisées, B et C) impuretés carbonatées (?) dans le grès. Photos prises en février 2017.



Champ magnétique total

Figure 5. Cartes modifiées du gradient vertical (champ magnétique total) (A) et du champ magnétique total (B) des données aéromagnétiques du MERN du Québec. Données du site de cartographie interactive du MERN (WEB).

Selon une étude du COREM, la minéralogie des orthoquartzites serait caractérisée par un assemblage dominé par le quartz et avec des proportions variables de minéraux secondaires incluant la calcite (< 2,1 %) et ou la dolomite (ankérite) (<11,3 %), des micas (<1,4 %), des oxydes de Fe-Ti (< 1 %), des feldspaths potassique et calcique (<0,8 %) et parfois de la pyrite (<0,26 %) et (**Goudreau et Lévesque, 2002**). Les échantillons riches en quartz contiendraient moins de 1,1 % de minéraux autres que le quartz (**Goudreau et Lévesque, 2002**).

1.3. Bref historique

Les premiers travaux régionaux, cités dans les données disponibles du gouvernement du Québec (série des GM), remontent aux travaux de terrain réalisés par les géologues **Clark (1972)** et **Globensky (1986, 1987).** En plus de ces travaux, ces derniers ont, entre autres, subdivisé les roches sédimentaires des Groupes de Postdam et de Beekmantown en différentes Formations stratigraphiques. La Formation de Cairnside, constituant l'unité hôte du gite de silice de Ste-Clotilde, étant caractérisée par la présence et la qualité de ces orthoquartzites.

Pour la période antérieure à 1985, le rapport de **Pelletier (2002)** indique plusieurs tentatives de mise en production de silice dans le secteur de Ste-Clotilde. Par exemple, le gîte Radius aurait été exploité de 1955 à 1957 (Globensky, 1986) avec une capacité de traitement de l'ordre de 150 tonnes/jour. A cette époque, quelques forages et puits d'observation peu profonds auraient été effectués. En 1961-1962, la compagnie Moulin Silice Ltée aurait poursuivi l'exploitation du site de Radius pour fabriquer du Siporex (matériaux poreux à base de silice, chaux et poudre d'aluminium). Vitroc mining aurait réalisé de légers travaux d'exploration dans les années 1963-1966. Dans la période 1964-1965, la compagnie En-Ola Explorations réalisa une campagne de dix forages verticaux de 50 pieds. Cette même compagnie évaluait, selon les normes de l'époque, plus de 7,7 millions de tonnes courtes le tonnage « prouvé » par ces forages jusqu'à 100 pieds de profondeur (pour plus d'informations voir le rapport détaillé de Pelletier 2002b). À la même période, la compagnie En-Ola commandita des travaux de laboratoire pour vérifier la performance de différentes méthodes de purification de la silice. Selon les informations présentées dans le rapport de **Pelletier** (2002b), les méthodes magnétiques, électrostatiques et de lixiviation semblaient bien fonctionner sur les orthoquartzites de Ste-Clotilde.

En 1986, une cartographie géologique du terrain des rangs 2 et 3, ainsi qu'un échantillonnage préliminaire furent réalisés par la géologue Marie de Grosbois. Cette étude a démontré la présence de plusieurs types de grès siliceux et les orthoquartzites sur la propriété (blanc; blanc avec laminations foncées; verdâtre; gris). Les 4 échantillons de grès blancs analysés dans l'étude de de Grosbois ont des concentrations en Fe₂O₃ et Al₂O₃ respectivement inférieures à 0,29 et 0,14 %, tandis que les autres types de grès montraient des concentrations en Fe₂O₃ et Al₂O₃ supérieures à 0,24 et 0,12 %. Compte tenu de la nature subhorizontale de la stratigraphie sur la propriété de Ste-Clotilde, des levés du relief du sol ont été réalisés en 1990, 1991, 1992 et 1994, afin d'améliorer la cartographie géologique des unités d'orthoquartzites (Pelletier, 2012). Ce levé, réalisé à l'aide d'un niveau chaine électronique, avais une précision de l'ordre de 50cm. Un levé de réfraction et de réflexion sismigue, réalisé par la compagnie Géophysique Sigma, a été effectué dans les rangs 1 et 2. Ce levé de 1996, totalisant 4300 mètres, a été fait le long de 3 lignes. Les résultats de l'étude sismique suggèrent la présence d'un mort-terrain d'une épaisseur de 0 à 3,5 mètres (+/-1,5m) ainsi que la présence d'une roche saine avec une vélocité séismique de 4000 à 4300 mètres par seconde (ondes de compression). De 1985 à 2000, dix forages carottés, totalisant 346 mètres, ont été réalisés pour le compte de J.A.G. Les données de cette campagne ont permis de localiser les 4 types de grès préalablement identifiés par la géologue de Grosbois. La localisation des forages, répertoriés dans la banque de données officielles du MERN, est présentée à la figure 6.

A la demande de Ressources Antoro inc., Le COREM a réalisé en 2003 (**Goudreau et al., 2003**) une étude minéralogique de 8 échantillons d'orthoquartzites provenant de la propriété Ste-Clotilde. L'étude a montré que les orthoquartzites avaient plus de 97 % de SiO₂ et que le Fe_2O_3 était le principal contaminant observé. Les minéraux observés en faibles proportions, par la méthode de diffraction des rayons-x, sont le mica (muscovite), les felsdpaths sodique et potassique et les carbonates (calcite, dolomite, ankérite).



Figure 6. Carte de localisation des forages réalisés sur la propriété Ste-Clotilde selon les données disponibles, au 30 août 2016, sur le site WEB du MERN (carte interactive). Le plan B montre la position des forages sur un fond d'image satellite.

2. DONNÉES STATISTIQUES

Date de mobilisation :	17 février 2017
Date de démobilisation :	24 février 2017
Date du début du levé :	18 février 2017
Date d'interruption :	24 février 2017
Date de reprise :	27 février 2017
Date de fin du levé :	28 février 2017

2.1 PERSONNEL AFFECTÉ À LA RÉALISATION DU LEVÉ GÉOPHYSIQUE SUR LE SITE DE STE-CLOTILDE

Marc Richer-LaFlèche (responsable)

Danie Auclair (assistant de terrain)

Dany Boilard (assistant de terrain)

Luc Bélanger (technicien)

2.2 TYPE DE LEVÉS GÉOPHYSIQUES RÉALISÉS EN FÉVRIER 2017 SUR LA PROPRIÉTÉ STE-CLOTILDE

2.2.1 Levé magnétométrique (GSM-19)

Le levé magnétométrique (et gradiométrique) GSM-19 a été principalement réalisé en mode *walking mag and grad* en utilisant un DGPS utilisant un système correctif Omnistar. Des mesures en mode station ont également et prises.

2.2.2. Levé électromagnétique (Promis-10)

Le levé de résistivité électrique apparente, réalisé par induction électromagnétique en domaine fréquentiel (Promis-10), compte 265 stations pour une distance linéaire totale de 6,6 km.

L'espacement entre les stations de mesure était de 25m et la distance entre l'émetteur et le récepteur de 100m.

2.2.3. Levé de résistivité et de chargeabilité électrique en mode d'imagerie tomographique :

Le levé de résistivité et de chargeabillité électrique, réalisé en mode d'imagerie tomographique (Terrameter LS 12 canaux), a été réalisé le long d'une section de 400m longeant la ligne 7. L'espacement interélectrode était de 5m et 4 câbles de 100m de longueur avec 16 électrodes chacun ont été utilisés (4 x 100m). Le protocole Gradient a été utilisé afin de produire une imagerie de qualité dans un environnement trop bruité pour réaliser un levé de type dipôle-dipôle.

3. METHODOLOGIE

3.1 LEVE MAGNETOMETRIQUE

Dans ce projet, nous avons utilisé un magnétomètre-gradiomètre de type GSM-19 (v 7.0) de type *walking mag and grad* (GEM Systems). Les options de l'appareil permettent une opération en mode continu (*walking mag and walking grad*) et ou discontinu (*mobile mag and grad*). L'appareil utilise le principe de l'effet Overhauser pour accentuer la polarisation des protons. Contrairement aux magnétomètres classiques à protons, la cellule de ce magnétomètre contient un radical libre ainsi qu'un générateur de radiofréquence (RF) qui permet de perturber le couplage électron-proton. En saturant les lignes de résonance des électrons libres, la polarisation des protons est plus efficace. Ce phénomène se traduit par la production de signaux plus intenses et ce malgré la présence de détecteurs sensiblement plus petits (utilisant moins d'énergie). De plus, le système de détection de l'appareil est plus tolérant à de fortes variations du champ magnétique local.

Les données magnétométriques ont été prélevées à une fréquence de 1Hz ce qui correspond à une mesure du champ magnétique total et du gradient magnétique par seconde. Le temps d'acquisition, pour les données mesurées en mode station, était de 5 secondes et l'espacement des stations était de 12,5m. Pour accentuer les contrastes magnétiques, et localiser avec précision la présence de fines structures magnétiques, nous avons mesuré le gradient magnétique en utilisant un deuxième détecteur Overhauser situé à 0,60 m au-dessus du premier. L'utilisation simultanée de deux capteurs superposés permet de calculer la différence des deux signaux magnétiques. Ce paramètre n'est pas influencé par les variations diurnes du champ magnétique terrestre. Ainsi, les données gradiométriques peuvent être comparées d'une zone à l'autre et ce sans devoir appliquer de corrections.

Les données du champ magnétique total, mesurées par le premier détecteur, ont été corrigées pour tenir compte de l'effet de dérive du champ magnétique terrestre lors du levé. Pour ce faire, nous avons utilisé une station de base (magnétomètre) de type GSM-19 fonctionnant en mode automatique (une mesure aux 4 secondes). Cette station a été installée dans un boisé situé à plus de 250m de la route ou d'une ligne électrique rurale. Ces données ont été utilisées pour corriger les fluctuations reliées aux variations diurnes du champ magnétique terrestre. L'examen des données de la station magnétique permet de constater qu'aucune tempête magnétique significative n'a perturbé le levé magnétométrique réalisé en février 2017 à Ste-Clotilde (**Fig. 7 et 8**).

Dans des conditions idéales, la sensibilité du magnétomètre GSM19 est de 0,01 nT et en fonction d'écarts considérables de température cette sensibilité peut atteindre 0,2 nT. Les données de positionnement GPS ont été acquises à l'aide d'un DGPS Novatel (non magnétique) spécialement conçu pour une utilisation avec magnétomètre et possédant la capacité de capter les signaux de correction en provenance du système de satellites Omnistar (Trimble). L'utilisation de ces données de correction permet d'obtenir une résolution submétrique. Comme spécifié par *GEM systems*, l'antenne du GPS était située à plus de 50 cm des détecteurs magnétiques.

Le levé magnétique a été réalisé par Dany Boilard et Marc R. LaFlèche les 18, 21, 23, 24, 27 et 28 février 2017. A l'arrivé sur la propriété de Ste-Clotilde, le 17 février 2017, les piquets de ligne étaient ensevelis sous la neige et en position horizontale (dans plus de 80% des cas). Cette observation était étonnante compte tenu du fait que les lignes avaient été coupées à l'automne 2016. La quasi-absence de sols, au-dessus des roches sédimentaires, pourrait expliquer ce phénomène. L'équipe de terrain a été obligé de *re-chainer* l'ensemble des lignes

du périmètre du levé. La température très chaude (max. 17°C) et les conditions de fonte de neige, de pluie et d'inondation partielle du terrain ont ralenties de beaucoup l'avancement des travaux. Les opérateurs devaient porter des cuissardes de pêche en néoprène compte tenu de la température glaciale de l'eau et de son épaisseur sur le terrain (barrage de castor). Un levé magnétométrique de haute résolution (couplage DGPS) a été réalisé par Dany Boilard les 23 et 24 février 2017. Ce levé a été refait par Marc R. LaFlèche les 27 et 28 février 2017 en raison de problèmes de la qualité des données DGPS lors du levé du 23 février 2017 (ciel couvert, très fortes précipitations).



FIGURE 7. Variabilité des données du champ magnétique total mesurées à la station de base magnétique de la propriété Ste-Clotilde. La qualité des données est indiquée par le facteur de qualité exprimé en %. Données du 18, 21, 23 et 24 février 2017.



FIGURE 8. Variabilité des données du champ magnétique total mesurées à la station de base magnétique de la propriété Ste-Clotilde. La qualité des données est indiquée par le facteur de qualité exprimé en %. Données du 27 et 28 février 2017.

3.2 LEVE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE EN DOMAINE FREQUENTIEL (PROMIS-10)

Les levés électromagnétiques (EM) sont principalement utilisés pour cartographier les variations de conductivité électrique et ou de résistivité électrique du substrat quaternaire et des formations géologiques sous-jacentes. Ces méthodes sont particulièrement bien adaptées pour localiser des conducteurs électriques dans des roches électriquement résistives. Des applications environnementales sont aussi possibles, la technologie pouvant permettre, par exemple, d'établir des contrastes hydrogéologiques et d'identifier des zones contaminées. Les levés EM sont de deux types: levé EM en domaine de fréquence (*FDEM*) et levé EM en domaine de temps (*TDEM*). Le système Promis-10 (Iris Instruments), utilisé sur la propriété Ste-Clotilde, permet d'effectuer des levés EM du premier type.

Dans le système Promis-10, la distance entre l'émetteur et le récepteur peut atteindre 200m et parfois même 400m lorsque le dégagement sur le terrain le permet. Dans le cas présent, cette distance a été fixée à 100m car l'objectif n'était pas de prospecter le terrain à des profondeurs supérieures à celles normalement atteintes lors de l'exploitation de carrières de minéraux industriels ou d'agrégats. La profondeur maximale de pénétration du levé réalisé à Ste-Clotilde correspond à environ 75% de la distance entre l'émetteur et le récepteur (Tx-Rx) lorsque les unités rocheuses et le substrat quaternaire sont modérément conducteurs et à 125% lorsque les unités sont plus résistives (ex. grès siliceux). Ainsi, la profondeur maximale d'investigation du présent levé est probablement de l'ordre de 100 à 125m. Notez que pour des dispositifs avec de grandes distances entre émetteur et récepteur (ex. 200 et 400m), la résolution spatiale des données diminue. Afin d'obtenir une résolution satisfaisante, le dispositif émetteur (Tx) - récepteur (Rx) a été déplacé de 25m (1/4) le long des différentes lignes. Les données mesurées par le système Promis-10 sont spatialement attribuées à la position du centre du dispositif (Tx-Rx) soit à une distance de 50m. Ceci explique pourquoi la première station de mesure des différentes lignes débute à 50m. Pour le levé réalisé à Ste-Clotilde, les stations de mesure se suivent avec un pas de 25m jusqu'à la fin de la ligne (50, 75, 100, 125, 150, 175m).

La fréquence du signal électromagnétique inductif a une influence sur la pénétration verticale des levés EM en domaine de fréquence et ce sont les basses fréquences qui montrent la plus

forte pénétration verticale. La **figure 9** illustre la pénétration des ondes électromagnétiques dans un milieu isotrope. Dans un système EM classique, le champ électromagnétique oscillatoire émis par l'émetteur (Tx) provoque la formation de courants primaires (en phase) et secondaire (en quadrature) dont l'intensité sera enregistrée par le récepteur (Rx) (**Fig. 10**). En général, la composante en phase répond promptement aux fortes valeurs de susceptibilité magnétique des matériaux et à la présence de très forts conducteurs électriques comme des structures métalliques. Par contre, la composante en quadrature est fortement contrôlée par les variations de conductivité électrique dans les sols et les roches.



Figure 9. Variation de la pénétration verticale (volume d'intégration) en fonction de la fréquence d'induction des systèmes électromagnétiques en domaine de fréquence. Notez que les basses fréquences sont beaucoup plus pénétratives que les hautes fréquences.



Figure 10. Dispositif d'induction électromagnétique avec boucles d'émission (émetteur Tx) et de réception (récepteur Rx) montrant le processus de pénétration du champ électromagnétique dans le sol et la génération de courants et champs magnétiques secondaires enregistrés par le récepteur.

3.2.1 Système Promis-10 (Iris Instruments)

Le système Promis-10 est une technologie relativement récente développée par Iris Instruments (France). Pour certains aspects, il ressemble à la technologie Max-Min développée par Apex Parametrics. Comparativement au système Max-Min 1-8, le Promis-10 permet l'induction d'un champ électromagnétique caractérisé par de hautes fréquences pouvant atteindre 56 320 Hz en plus des fréquences plus usuelles entre 110 Hz et 14 080 Hz. Ces hautes fréquences permettent l'investigation de la proche surface. De plus, une des caractéristiques propres au système Promis-10 est la possibilité de mesurer les champs magnétiques secondaires selon 3 axes, X, Y et Z, ce qui permet la résolution de problèmes géométriques plus complexes.

Le moment magnétique est un indicateur de la puissance du champ magnétique généré par la bobine d'induction du système (Tx). Plus les fréquences utilisées sont bases, plus l'émetteur du Promis-10 ajustera sa puissance pour générer un moment magnétique de plus en plus

élevé (voir tableau suivant) et plus grande sera la pénétration verticale, de sorte que le rapport signal / bruit de fonds obtenu sera meilleur et plus facile à interpréter.

<u>Fréquence</u>	moment magnétique
220 Hz	250670 mA.m ²
880 Hz	237544 mA.m ²
3520 Hz	157917 mA.m ²
14080 Hz	59888 mA.m ²
56320 Hz	14996 mA.m ²

L'émetteur du système Promis-10 peut être manipulé en position horizontale (**Fig. 11 et 12**) ou verticale. Dans le cas présent, le dispositif a été maintenu en position horizontale pour maximiser la profondeur d'investigation.

Système Promis-10 (Iris Instruments)



Figure 11. Système d'induction électromagnétique Promis-10 de Iris Instruments (Photo : Iris Instruments).



Figure 12. Principales constituantes de l'émetteur et console du récepteur du système Promis-10.

3.3 PARAMÈTRES D'ACQUISITION DU LEVÉ DE TOMOGRAPHIE GÉOÉLECTRIQUE **ABEM T**ERRAMETER-LS RÉALISÉ À STE-CLOTILDE

Paramètres généraux

• géométrie du dispositif source:

Dispositif « gradient » (multiple potential gradient method)

• Dispositif de câbles :

Quatre câbles multi-connecteurs aquatiques ABEM-France de 16 sorties (4 x 16) en acier inoxydable

- géométrie du dispositif récepteur : linéaire (câbles multi-connecteurs)
- espacement entre les électrodes : 5 m

• caractéristiques de la source d'énergie utilisée :

Source électrique (2 batteries nautiques 12 V).

• réglage des filtres d'enregistrement :

Filtre 60 Hz activé, car ligne électrique rurale présente en bordure de la route de rang

• coordonnées GPS:

Les données instrumentales sont mesurées avec des données GPS exprimées en coordonnées utm NAD83

En raison des risques reliés à l'opération du système en milieu saturé d'eau (haute conductivité) le voltage maximum d'émission a été fixé à 400 volts. La précision du système de réception du signal mesuré par les électrodes de potentiel est de 0,1% et la reproductibilité de l'ordre de 0,2%. La résolution du récepteur est de 3 nV pour une intégration d'une seconde. La précision de l'émetteur de courant est de 0,1% et sa reproductibilité de 0,2%.

Pour ce levé, le mode d'acquisition gradient (protocole « *multiple potential gradient method »*d'ABEM) a été utilisé afin d'obtenir une bonne résolution spatiale et un rapport pic / bruit de fond élevé. Ce dispositif permet la réalisation d'un levé relativement rapide en prenant avantage des nombreux canaux d'acquisition du Terrameter-LS (version 12 canaux). Notez que la méthode dipôle-dipôle n'a pas été retenue en raison du bruit de fond électrique localement élevé.

Le logiciel ZondRes2D a été utilisé pour le traitement des données acquises et l'inversion des données de résistivité électrique apparente. Ce logiciel permet d'évaluer la qualité des données et ce avant de procéder à l'inversion des données. Il est de plus compatible avec d'autres logiciels d'inversion comme le programme RS2DINV. Son coût d'acquisition est également abordable.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Présentation des données du levé magnétométrique réalisé sur la propriété Ste-Clotilde

4.1.1 Données d'élévation

La figure suivante montre la variabilité des données d'élévation mesurées à l'aide du DGPS Trimble installé sur le magnétomètre GSM-19 lors du levé de février 2017. Lors de l'acquisition des données, un système correctif satellitaire Omnistar a été utilisé afin d'améliorer la qualité des données de positionnement GPS. La linéarité des points dans le périmètre du levé atteste de la qualité des données (**Fig. 13**). Notez que pour atteindre cette précision le relevé à nécessité deux périodes d'acquisition.



Figure 13. Carte d'élévation (en mètre) du périmètre du levé géophysique de Ste-Clotilde. Les points noirs sur la carte correspondent aux données magnétiques mesurées conjointement avec les données DGPS Trimble et utilisant des données de correction satellitaire Omnistar.

Les données d'élévation montrent de faibles variations (57 à 66 m). Ceci reflète la nature subhorizontale des grès du Postdam et aussi la très faible épaisseur de sol au-dessus du roc. Notez la présence d'un haut topographique situé du côté sud-ouest du périmètre. Le roc présent dans ce secteur a été localement exploité dans le passé comme en témoigne de nombreux vestiges d'excavation (**secteur I**) (**Fig. 13**). Il est probable que l'unité en question devait avoir une qualité (hautes concentrations en SiO₂ et relativement peu d'impuretés) pour la production de silice industrielle. Notez que cette unité est stratigraphiquement plus haute que celles présentes dans les parties centrale et Est de la propriété (**II** et **III**). Lors des levés géophysiques, les zones situées à des élévations inférieures à 59,75m étaient systématiquement inondées (**Fig. 13 et 16**).

4.1.2 Dispositif (réseau de ligne)

Pour permettre la réalisation du levé géophysique sur la propriété Ste-Clotilde, les données ont été mesurées suivant un nouveau réseau de lignes orientées NO-SE. Ce réseau de ligne, espacé de 50m, débute à la ligne 1 située près de la route du rang 3 (Ouest) et se termine à l'Est près de l'ancien chemin de fer maintenant transformé en sentier de motoneige et VTT. La **figure 14** présente un plan du dispositif de ligne réalisé à l'automne 2016 sur la propriété Ste-Clotilde.



Fig. 14. Carte de localisation du périmètre du levé géophysique de la propriété Ste-Clotilde et des lignes provenant de la coupe de ligne de l'automne 2016.

Les levés magnétométriques ont été principalement réalisés sur un terrain recouvert de 35 à 50cm de neige (voir photos de l'annexe 1b). Une visite de terrain, suite à la fonte rapide de la neige, a montré un grand nombre d'objets métalliques affectant la qualité des données du levé magnétométrique. Des casiers de homard (**Fig.15a**), des barils en acier de 45 gallons (**Fig.15d**), des pneus d'autos et de camions, des embarcations (**Fig.15c**), de vieux électroménagers, des matelas, de vieilles clôtures effondrées sur le sol, du fil barbelé récent et bien d'autres objets ont été observés le long des lignes. De plus, nous avons localisé dans le boisé un ancien bâtiment (**Fig.15f**) ayant servi d'entrepôt de dynamite lors de l'exploitation d'une ancienne carrière. Ces structures métalliques influencent fortement les données magnétiques et aussi les données de résistivité électrique mesurées par induction électromagnétique.

En plus des problèmes reliés à la présence de déchets et autres objets métalliques, le terrain était localement inondé avec localement plus de 1m d'eau dû à la fonte de la neige, de la pluie et de la présence d'un barrage de castor. Cette présence d'eau recouverte d'une couche de glace instable rendait difficile la réalisation des evés (**Fig. 16**).



Figure 15. Photographies de terrain montrant la présence de déchets et autres éléments métalliques sur la propriété Ste-Clotilde. A) pièges à homard B) pompe de piscine C) chaloupe D) barils de 45 gallons E) déchets divers F) bâtiment en tôle (ancien entrepôt d'explosif) G) boite de camion H) déchets divers I) clôture métallique.



Fig. 16. Inondation du terrain lors des levés géophysiques de février 2017. C et D) terrain inondé. A) champ de quenouilles en terrain marécageux, B) sentier provincial de VTT et motoneige.

4.1.3 STATION DE BASE ET CORRECTIONS DES DONNEES

Les données magnétiques, mesurées par le magnétomètre de terrain (unité mobile), doivent être corrigées pour la variabilité diurne du champ magnétique terrestre. Dans le cas d'une tempête magnétique, la variation observée à une station de base magnétique peut être de 2000 nT tandis que pour une journée normale la variation ne dépasse généralement pas 1% de la valeur du champ magnétique total. La variabilité des données magnétiques tend à être très faible durant la nuit et devient maximale vers 12h00.

Les données de la station de base de la propriété Ste-Clotilde, rapportées en fonction du temps (en secondes), sont présentées aux **figures 7 et 8**. Les variations du champ magnétique total, observées sur ces figures, ne montrent pas d'évidences de fortes variabilités

pouvant être associées à une tempête magnétique solaire. Les données de la station de base ont été utilisées pour corriger les données mesurées par le magnétomètre mobile utilisé pour faire le levé le long du dispositif de lignes.

4.1.4 DONNEES MAGNETIQUES CORRIGEES

Les données corrigées du champ magnétique total, interpolées par krigeage, sont présentées à la **figure 17**. Dans l'ensemble, la carte montre une variabilité des données démontrant une augmentation des valeurs vers le nord et le nord-est du périmètre. Les domaines indiqués par les chiffres **IV**, **V et VI** sont de nature anthropique et reliés à la présence d'objets métalliques (clôtures, débris métalliques, rails de chemin de fer enfouis etc.). Les domaines anomaliques indiqués par le chiffre **I** correspondent à des objets métalliques visibles à la surface (voiture, baril de 45 galons, pompe en acier; **figure 15**). Le domaine **II** correspond à la signature naturelle du terrain reflétant la présence d'un grès siliceux très peu magnétique et d'une très fine couverture de sol. Ces domaines ont été peu affectés par les différentes interventions humaines. Le domaine **III**, également très peu magnétique, correspond à un affleurement de d'orthoquartzite très blanche donc pauvre en impuretés d'oxydes de Fe et ou Fe-Ti. Le domaine **VII**, présent dans la partie centre-nord de la carte, correspond en grande partie à la zone inondée du terrain. Ce secteur semble recouvert d'une fine couche de sédiments limoneux rehaussant localement les valeurs du camp magnétique total (**Fig. 17**).



Figure 17. Carte des données corrigées du champ magnétique total et interpolées par krigeage pour le périmètre du réseau de ligne de la propriété Ste-Clotilde.

4.1.5. Données du champ magnétique total corrigée par la méthode de réduction aux pôles

Compte tenu de l'importance de la déclinaison et de l'inclinaison du champ magnétique terrestre dans le sud du Québec, les données magnétiques de terrain doivent idéalement être corrigées par la méthode de réduction aux pôles. Cette méthode facilite l'interprétation des données car pour une anomalie donnée, un seul pic est centré sur le dipôle. Ceci est possible car la méthode transforme les données pour un contexte de déclinaison magnétique de 90 degrés et une inclinaison magnétique de 0 degré. Pour faire cette réduction des données magnétiques, nous avons utilisé le logiciel Magmap d'Oasis Montaj (Geosoft). La carte suivante montre les données magnétiques corrigées par cette méthode. Les données présentées sur la carte sont sensiblement différentes de celles non-corrigées (**Fig. 17**). La carte de la **figure 18** montre un domaine anomalique **V** longeant le chemin de rang. Compte

tenu de la courte distance entre la ligne 1 et la ligne électrique longeant le chemin de rang, ce secteur est probablement affecté par le champ magnétique de la ligne électrique d'Hydro-Québec (Fig. 18). De plus, une énorme anomalie d'apparence dipolaire (haut magnétique bordé par un creux magnétique) est présente dans la partie NE de la carte (domaines I et II) et plus spécifiquement en bordure de l'ancien chemin de fer dans le secteur des lignes 10 à 13. Cette anomalie pourrait s'expliquer par la présence d'anciens rails de chemin de fer enfouis sous un remblai. Les domaines III et IV correspondent au terrain naturel dominé par les grès siliceux recouvert d'une fine couche de sol. La chute des valeurs du champ magnétique en passant des domaines III à IV pourrait refléter une variation de la susceptibilité magnétique des grès en allant vers le sud-est (Fig. 18).



Données du champ magnétique total corrigées au pôle

Figure 18. Carte des données du champ magnétique total corrigées pour la variation diurne et la réduction aux pôles.

4.1.6. Données du gradient magnétique mesuré

Les données du gradient magnétique, mesurées à l'aide des deux senseurs magnétiques, permettent de préciser la position des principales anomalies magnétiques observées dans le périmètre du levé géophysique (**Fig. 19**). Les zones anomaliques **Va**, **Vb** et **Vc** sont des secteurs où des résidus métalliques anthropiques ont été observés en surface (**fig. 14b, d, e, g, h**). La puissante anomalie magnétique située en bordure de l'ancien chemin de fer (**I** et **II**) est particulièrement bien visible sur les lignes 10 et 11.



Figure 19. Carte des données du gradient magnétique mesuré par les deux senseurs magnétiques du système GSM-19. Les données gradiométriques permettent de localiser rapidement les principales anomalies magnétiques dans le périmètre du levé.

4.1.7. Données de la dérivée verticale première du champ magnétique total corrigé par la méthode de réduction aux pôles.

La dérivée verticale première, appliquée à des données de champ potentiel (ex. Blakely, 1996), est une méthode utile pour distinguer les effets reliés à la présence de masses locales incluses dans des données régionales (ex. Jorgensen, 2004; Aydemir et Abdullah, 2008). Notez qu'en magnétométrie, l'effet de petites masses ponctuelles est parfois masqué par la réponse de larges masses. La dérivée verticale première permet de cerner la présence d'anomalies régionales ou locales (ex. Robinson and Silvia, 1981). La figure 20 montre le résultat du calcul de la dérivée verticale première pour les données du champ magnétique total corrigées par la méthode de réduction par rapport aux pôles. Le domaine magnétique hautement anomalique situé en bordure de l'ancien chemin de fer est particulièrement évident. Les sites de déchets métalliques observés dans la partie SO er Sud de la propriété répondent bien à la dérivée verticale première du champ magnétique total.



Figure 20. Carte des données de la dérivée verticale première du champ magnétique total corrigé par la méthode de réduction aux pôles.

4.1.8. Données du signal analytique calculées à partir des données du champ magnétique total corrigées pour la variation diurne.

La méthode du signal analytique permet de localiser rapidement la source d'anomalies magnétiques et ce indépendamment de l'inclinaison et de la déclinaison du champ magnétique terrestre. Dans un secteur anomalique, le maximum du signal analytique est à l'aplomb des structures magnétiques responsables de la formation des anomalies observées sur les cartes. Le signal analytique est calculé en fonction de la somme des dérivées en X, Y et Z du champ magnétique total.

La **figure 21** indique clairement la position dans l'espace des principales anomalies anthropiques (**Va, Vb, Vc, Vd, Ve**) reliées à la présence de matériaux ferreux de nature anthropique (barils, pneus, pompe, fil barbelé, ancienne clôture, voiture calcinée, tôle galvanisée etc..). Le domaine anaomalique **VI** reflète la proximité de la ligne électrique rurale près du chemin. L'anomalie **I**, principalement située à la fin des lignes 11, 12 et 13, correspond au site probable d'enfouissement de matériaux de fer comme d'anciens rails ou autre structures métalliques. Les domaines **II** et **III** correspondent au terrain primaire non-affecté par la présence de déchets ou autres objets ferreux.



Figure 21. Carte des valeurs du signal analytique calculées à partir des dérivées en X, Y et Z du champ magnétique total corrigé pour la dérive diurne.

4.2 PRÉSENTATION DES DONNÉES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE DU LEVÉ D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE FRÉQUENTIEL (**P**ROMIS-10)

Les données de résistivité électrique apparente, interpolées par krigeage, sont présentées en plan (**Fig. 22 à 25**) et ce pour les différentes fréquences d'induction électromagnétique utilisées lors du levé réalisé sur la propriété Ste-Clotilde. Ces cartes sont présentées dans l'ordre en partant des données de sub-surface, mesurées à haute fréquence (**Fig. 22**), et en terminant par les données de basses fréquences beaucoup plus pénétratives (**Fig. 24 et 25**). Pour la fréquence d'induction de 56320Hz, les données de la **figure 22** montrent la présence de domaines de résistivité électrique apparente contrastés. Ces derniers sont principalement expliqués par le drainage et la topographie du terrain. Le domaine **I**, très résistif, correspond à des zones affleurantes ou sub-affleurantes de grès siliceux légèrement fracturés et de stratigraphie sub-horizontale. Le domaine **II** correspond à un secteur inondé probablement recouvert d'un sol forestier mince et d'une fine couche de sédiments limoneux. Ces matériaux sont nécessairement plus conducteurs que le roc constitué de grès siliceux massifs.



Figure 22. Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 56320Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.

La carte des valeurs de résistivité électrique apparente, pour la fréquence d'induction de 3520Hz, montre une variabilité principalement contrôlée par la présence de zones affleurantes ou sub-affleurantes de grès siliceux (**Fig. 23**). Les valeurs de plus de 1300 Ohm-m (domaine **I**) correspondent à des affleurements de grès siliceux et orthoquartzites occupant des hauts topographiques sur le terrain. Ces zones de roc sont le plus souvent situées au-dessus du niveau de la nappe phréatique. Les zones montrant des valeurs de résistivité électrique apparente de l'ordre de 1100 à 1200 Ohm-m (domaine **II**) sont des secteurs montrant la présence de grès siliceux sub-affleurants mais localisés dans à de plus faibles élévations. Le domaine **III** correspond à la zone forestière marquée par la présence d'un sol plus important et un plus faible relief. Le roc dans ce secteur est probablement peu profond mais en raison de la plus faible altitude, la nappe phréatique est moins profonde et les fractures dans le roc sont probablement saturées d'eau ce qui peut expliquer la diminution des valeurs de résistivité électrique apparente observée dans ces secteurs. Ce phénomène de saturation en eau des fractures dans les grès est facilement observable en bordure de la fosse de la carrière Sicotte située à proximité du périmètre du levé (voir photos de l'annexe 1d).



Figure 23. Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 3520Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.

Les données de résistivité électrique apparente, pour les plus basses fréquences d'induction, montrent des distributions plus complexes et moins bien organisées que pour les hautes et moyennes fréquences moins pénétratives (**Fig. 24 et 25**). La variabilité observée semble indépendante de la topographie et de la géomorphologie du terrain. Par exemple, le secteur des lignes 2 et 3 est moins résistif que pour les fréquences d'induction plus élevés. La variabilité observée dans les données pourrait refléter des variations de saturation en eau et du degré de fracturation des roches pouvant modifier les valeurs de résistivité électrique observées. De plus, les roches de surface sont naturellement plus exposées au processus d'intempérismes physique et chimique des roches ce qui tend à diminuer les valeurs de

résistivité électrique de ces dernières. Ces processus affectent généralement les roches de subsurface d'une façon hétérogène ce qui peut expliquer en partie la variabilité observée dans les données de résistivité électrique apparente.



Figure 24. Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 880Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.



Figure 25. Carte des valeurs de résistivité électrique apparente mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 220Hz. Données interpolées par krigeage. Les stations sont indiquées par un point noir.

44

4.3 TOMOGRAPHIE GEOELECTRIQUE (ABEM TERRAMETER LS)

Afin de faciliter l'interprétation des données magnétiques et électromagnétiques, nous avons réalisé une section tomographique géoélectrique de 400m le long de la ligne 7. Le système utilisé est le Terrameter-LS (12 canaux) d'ABEM Suède. Des câbles multiconnecteurs avec espacement des électrodes au 5m ont été utilisés. Les données de résistivité électrique apparente ont été inversées à l'aide du logiciel ZondRes2D. L'imagerie tomographique géoélectrique obtenue, suite à l'inversion des données, montre une variabilité spatiale bien organisée reflétant les caractéristiques du roc et des unités de surface (**Fig. 26**). Le domaine **I** correspond aux grès siliceux et orthoquartzites relativement peu facturés et donc très résistifs. Vers le sud-est, les données deviennent abruptement moins résistives ce qui pourrait impliquer la présence de roches plus fracturées (faillées) et permettant une plus grande circulation d'eau souterraine et donc favorisant la propagation du courant électrique. Les domaines **III** et **IV** sur la section de résistivité électrique, suggèrent la présence de roches fracturées et un environnement saturé en eau. Notez que la majorité des données géoélectriques ont été mesurées sur la glace et que la colonne d'eau était d'environ 1m lors des mesures de février 2017.

En plus de la résistivité électrique, nous avons mesuré la chargeabilité électrique du terrain afin de vérifier l'effet de l'intempérisme chimique (chemical weathering) sur les grès siliceux et orthoguartzites du Postdam. Sachant que les grès siliceux primaires de la propriété contiennent une faible proportion d'oxydes de fer et de pyrite, ces matériaux devraient être légèrement polarisables. En conditions oxydantes, l'altération de ces minéraux se traduit par une instabilité des oxydes et sulfures primaires et la formation d'oxydes et hydroxydes de fer secondaires amorphes. Sur la propriété Ste-Clotilde, ces phases sont souvent observées le long de fractures (voir photos de l'annexe 1 e). Ces processus de météorisation chimique des roches tendent à neutraliser la chargeabilité du roc. L'imagerie de la chargeabilité électrique observée le long de la section 7 montre bel et bien ce phénomène (Fig. 26). Les grès, présents près de la surface, sont essentiellement non polarisables tandis que ceux situés plus en profondeur sont électriquement polarisables (domaines VI et VII). Le domaine VIII correspond en grande partie à l'unité de grès affectée par l'intempérisme chimique. Notez que le prélèvement de grès siliceux dans le domaine VII devrait être évité pour une utilisation comme source d'agrégats car la concentration en pyrite pourrait être supérieure aux normes industrielles.



Figure 26. Sections tomographiques géoélectriques de la résistivité électrique et de la chargeabilité électrique (polarisation induite) de la ligne 7 du périmètre du levé géophysique de Ste-Clotilde. Orientation de la section du SE au NO. Longueur de 400m et espacement des électrodes de 5m.

5. CONCLUSION

Le levé géophysique, réalisé sur la propriété Ste-Clotilde, visait dans un premier temps à vérifier la possibilité de détection d'hétérogénéités compositionnelles dans les grès siliceux et orthoquartzites du Postdam à l'aide de variations des propriétés magnétiques et électriques mesurées par un magnétomètre-gradiomètre et par un système d'induction électromagnétique en domaine fréquentiel. Les résultats du levé soulignent la présence d'un grand nombre de structures (ou objets métalliques) générant une multitude d'anomalies magnétiques nettement supérieures à l'intensité des variations normalement attendues pour des grès siliceux et des orthoquartzites. Sur toutes les cartes magnétiques, les sources anthropiques dominent. Du côté Est du périmètre, l'intensité de l'anomalie magnétique située en bordure de l'ancien chemin de fer à un impact sur le tiers des données mesurées dans le périmètre du levé. Les données de résistivité électrique apparente, obtenues par induction électromagnétique, permettent d'améliorer la compréhension géologique du terrain et ce malgré l'absence d'affleurements dans certains secteurs et d'un terrain localement inondé. Pour les hautes et

moyennes fréquences d'induction (peu pénétratives), la variabilité spatiale des données s'explique principalement par les variations d'élévation du terrain, le drainage des roches fissurées, la présence d'un étang de castor et d'une fine couche de sédiment limoneux recouvrant un sol primaire relativement peu épais. Avec de nouveaux logiciels d'inversion des données de type FDEM, il serait possible de produire des sections 2D plus réalistes de la résistivité électrique mesurée par la sonde Promis-10. Notez que le budget disponible pour la réalisation de ce projet ne permettait pas de procéder à l'acquisition de logiciels spécialisés ou de développer de nouveaux algorithmes permettant de modéliser ces données.

Compte tenu du terrain difficile, localement encombré de déchets métalliques et d'un milieu très souvent inondé, nous avons décidé de tester la méthode d'imagerie tomographique géoélectrique. Même si ce levé n'était pas prévu dans le contrat de recherche, nous avons réalisé un levé de 400m de longueur suivant la ligne 7. L'objectif premier de l'essai était de vérifier la pertinence d'utiliser cette méthode dans un contexte d'optimisation des opérations d'une éventuelle carrière de silice. Les données provenant de l'interprétation des données de la section géoélectrique semble indiquer que la méthode est pertinente pour localiser le roc frais relativement peu facturé et aussi pour évaluer les zones fracturées et saturées en eau. Ceci permet une première subdivision des matériaux présents dans le roc. Deuxièmement, les données de polarisation induite (ou de chargeabilité électrique) sont très sensibles à la présence d'oxydes de Fe-Ti (ex. magnétite, ilménite) et de sulfures variablement disséminées dans les grès. La pyrite, présente localement dans les grès de Ste-Clotilde, est un minéral pouvant être problématique pour la production d'agrégats de construction ou d'additifs pour le ciment (gonflement des remblais, fracturation du béton). Heureusement, la chargeabilité des grès de Ste-Clotilde est généralement faible ce qui suggère une bonne qualité de silice. Toutefois, comme le montre la section de la ligne 7 (extrémité NO), la chargeabilité peut localement être élevée. En plus de permettre l'identification de zones riches en impuretés électriquement polarisables, cette méthode permet d'évaluer et de cartographier le contact entre les roches altérées par les processus d'intempérisme chimique et physique et de localiser les roches essentiellement non-altérées. Cette cartographie géophysique de haute résolution peut avoir une importance pour la sélection de pierres de taille, pour la localisation de matériaux sans hématite et goethite (coloration de la silice) pour l'industrie du verre. Pour la production d'agrégats pour la construction, la méthode permet de délimiter les zones hautement polarisables afin d'éviter l'excavation de quartzites impures.

Pour maximiser l'utilisation des données géophysiques, il faudrait prélever des carottes de forage, de 0 à 50m de profondeur, pour mesurer différents paramètres pétrophysiques comme la résistivité électrique, la chargeabilité électrique, la susceptibilité magnétique, la densité et possiblement des paramètres comme la porosité et la perméabilité. Des analyses minéralogiques et de fluorescence-X devraient aussi être réalisées afin de corréler quantitativement les paramètres géophysiques, chimiques et minéralogiques des quartzites.

6. RÉFÉRENCES

Blakely, R.J., 1996. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge, UniversityPress, UK.

Clarck, T.H., 1972. Géologie de la région de Montréal, RG 152. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.

Globensky, **Y.**, **1986**. Géologie de la région de Saint-Chrysostome et de Lachine (sud), MM84-02; Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.

Globensky, Y., 1987. Géologie des Basses-Terres-du-Saint-Laurent MM85-02. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.

Goudreau, S. et Lévesque, S., 2002. Caractérisation de 8 échantillons de quartz. Rapport finale No. T0000534 du COREM pour Ressources Antoro inc. 33 pages.

Hinze, W. et al., 2005. New standards for reducing gravity observations : The North American Gravity Database, Geophysics, 70, 4, PP 25-32.

Huang, H. et Won, I.J., 2000. Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 5, no. 4, p. 31-41.

Jorgensen, C., 2004. Tectonic interpretation using potential field data for the Sweetgrass Arch Area, Montana-Alberta, Saskatchewan. Rocky Mountain Section AAPG Meeting, Denver, Colorado, August 9-11, 2004. P. 1-7.

Miller, H.G. et Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics 32, 213–217.

Pelletier, Y., 2002a. Projet Ste-Clotilde de Châteauguay : Campagne de forage 2002 et analyse des échantillons des forages de J.A.G. 2000. Rapport préliminaire. 35 pages.

Pelletier, Y., 2002b. Compilation des travaux géologiques et miniers PRS 474, 475, 476 - claim 4296432, propriété Ste-Clotilide, Ressources Antoro. 62 pages.

Spies, R.B., et Frischknecht, C.F., 1991. Electromagnetic sounding *in* Nabighian, M.N., ed., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, v.2, Application, p. 285-425.

7. REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes ont participé de près ou de loin à la bonne marche des travaux et nous tenons à les remercier. D'abord nos remerciements vont à M. François Desrosiers, président de Cartogeographix, pour nous avoir permis d'effectuer cette étude et pour en avoir assuré le financement et à M. Pierre Gévry pour l'accès à la propriété Ste-Clotilde et à la documentation technique pertinente pour la réalisation du projet.

Nous tenons spécifiquement à remercier, Daniel Auclair, Luc Bélanger et Dany Boilard pour l'assistance technique lors de la réalisation des travaux sur le terrain.

Complété à Québec, le 21 avril 2017

Marc Richer-Lafleche, géo. No. permis : 1055

Annexe 1a



Piste cyclable et de motoneige

Piste de motoneige et vtt

Annexe 1b



Levé Promis-10 (Iris Instruments)

Annexe 1c



fracturation des grès siliceux du Postdam

Annexe 1d



grès siliceux de la carrière Sicotte

Annexe 1e



Grés siliceux altérés par la circulation de fluides météoritiques (*weathering*)