

2008YE002-01

LES MINES JAG LTEE - RECHERCHE DE GAZ ET DE PETROLE ET MISE EN VALEUR DE LA PROPRIETE
CHARLEVOIX - LEVES GEOPHYSIQUES DANS LE SECTEUR DE BAIE-ST-PAUL - PHASE 1 - AN2 - TRAVAUX
2007-2008

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

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 



Les Mines JAG Itée

Recherche de gaz et de pétrole
et mise en valeur
de la

PROPRIÉTÉ CHARLEVOIX

Levés géophysiques dans le secteur de Baie-St-Paul

Phase 1 – An 2
Travaux 2007-2008

RAPPORT D'ÉTAPE
préparé par :

Marc Richer-LaFlèche, géo, Ph.D.
et Jean-Christophe Aznar, Ph.D.

INRS-ETE

Septembre 2008

SOMMAIRE

En mars 2006, **JAG** a obtenu du gouvernement du Québec deux permis de recherche pour le gaz et le pétrole totalisant 39 258 hectares dans la région de Charlevoix, un secteur relativement inexploré jusqu'à présent pour son potentiel en hydrocarbures. Toutefois, même si elles en sont éloignées géographiquement, les roches sédimentaires paléozoïques ordoviciennes de la propriété Charlevoix sont considérées comme faisant partie du bassin des Basses-Terres du St-Laurent.

La propriété Charlevoix fait partie d'un groupe de trois propriétés jalonnées par **JAG** en 2006, qui font l'objet de travaux d'exploration et de recherche pour le gaz et le pétrole. **JAG** a publié un programme d'exploration quinquennal visant ces propriétés en décembre 2006 et un programme d'exploration révisé en juillet 2008. Le présent rapport présente les résultats des travaux d'exploration, d'analyse et de mise en valeur de l'An1 (Phase 2) menés sur la propriété Charlevoix entre février 2008 et juillet 2008.

Les travaux suivants ont été réalisés au cours de l'An2: (1) un levé magnétométrique au sol incluant la mesure du champ magnétique total et du gradient magnétique (2) un levé de conductivité électrique au sol par induction électromagnétique multi-fréquences. Ces levés ont été réalisés sur deux périmètres situés respectivement au nord et au sud de la ville de Baie-St-Paul (Charlevoix).

les résultats obtenus au cours de l'An2 de la Phase 1 du programme d'exploration sont préliminaires. Ils seront intégrés à ceux de l'An3 pour éventuellement identifier des zones d'intérêt pour l'exploration d'hydrocarbures. Il est recommandé pour l'An3: (1) de procéder à un levé de résistivité électrique et de polarisation induite (2) de réaliser un levé pédogéochimique régional multidisciplinaire (3) de compléter la reconnaissance géologique et l'échantillonnage dans le secteur de la rivière du Gouffre et (4) de compléter le levé magnétométrique de l'estran de baie-St-Paul.

Table des matières

1. INTRODUCTION	5
1.1. LOCALISATION DE LA PROPRIÉTÉ CHARLEVOIX	5
2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET TRAVAUX ANTÉRIEURS	6
2.1. STRATIGRAPHIE DE LA RÉGION DE CHARLEVOIX	6
2.2. CARACTÉRISTIQUES DES UNITÉS PÉDOLOGIQUES ET QUATERNAIRES PRÉSENTES DANS LES PÉRIMÈTRES ÉTUDIÉS.	10
2.2.1. Secteur sud de Baie-St-Paul	10
2.2.2. Secteur nord de Baie-St-Paul	10
2.3. TRAVAUX ANTÉRIEURS	13
2.4 GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE ET PÉDOLOGIE	14
2.4.1. La vallée de la rivière du Gouffre	14
3. MÉTHODOLOGIE	17
3.1 LEVÉ MAGNÉTOMÉTRIQUE	17
3.2 LEVÉS DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE PAR INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE	20
3.2.1 Levé de conductivité électrique (sonde GEM-2)	20
3.3 LOCALISATION DES PÉRIMÈTRES DE LEVÉS GÉOPHYSIQUES RÉALISÉS DANS LA RÉGION DE BAIE-ST-PAUL	23
3.3.1 Secteur Sud de Baie-St-Paul (périmètre sud)	23
3.3.2 Secteur Nord de Baie-St-Paul (périmètre nord)	25
3.4 DISPOSITIF DE LIGNES ET CONTRAINTES DE TERRAIN	27
3.4.1 Périmètre sud	27
3.4.2 Périmètre nord	30
4. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES	33
4.1 LEVÉS DANS LE PÉRIMÈTRE SUD	33
4.1.1. Levés magnétométriques	33
4.1.1.1 <i>Levé magnétométrique du périmètre sud</i>	37
4.1.1.2 <i>Données de susceptibilité magnétique</i>	42
4.1.2. Levés de conductivité électrique	46
4.1.2.1 Levé de conductivité électrique dans le périmètre sud	46
4.1.2.1.1 <u>Haute fréquence (4530 Hz)</u>	48
4.1.2.1.2 <u>Fréquence intermédiaire (1830 Hz)</u>	52
4.1.2.1.3 <u>Basse fréquence (630 Hz)</u>	55
4.2 LEVÉS DANS LE PÉRIMÈTRE NORD	58
4.2.1 Levé magnétométrique dans le périmètre nord	58
4.2.2 Levé de conductivité électrique dans le périmètre nord	59
4.2.2.1 <i>Haute fréquence (4530 Hz)</i>	60
4.2.2.2 <i>Fréquence intermédiaire (1830 Hz)</i>	62
4.2.2.3 <i>Basse fréquence (630 Hz)</i>	64

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	67
6. REMERCIEMENTS	69
7. RÉFÉRENCES	70
ANNEXE 1 : Méthode de traitement des données géophysiques	72

1. INTRODUCTION

En mars 2006, **JAG** a obtenu du gouvernement du Québec deux permis de recherche pour le gaz et le pétrole totalisant 39 258 hectares dans la région de Charlevoix (Fig. 1).

La propriété Charlevoix fait partie d'un groupe de trois propriétés jalonnées par **JAG** en 2006, qui font l'objet de travaux d'exploration et de recherche de gaz et de pétrole. Le présent rapport présente les résultats des travaux d'exploration, d'analyse et de mise en valeur de l'An2 (Phase 1) menés sur la propriété Charlevoix entre février 2008 et mars juillet 2008.

1.1. LOCALISATION DE LA PROPRIÉTÉ CHARLEVOIX

JAG a acquis dans la région de Charlevoix, une zone de 39 258 hectares, située dans les unités sédimentaires ordoviciennes des grabens des rivières du Gouffre et de la Malbaie, un secteur relativement inexploré jusqu'à maintenant pour son potentiel en hydrocarbures. Même si elle en est éloignée géographiquement, on considère que la propriété Charlevoix fait partie du bassin des Basses-Terres du St-Laurent.

La propriété Charlevoix comprend les deux permis 2006PG844 et 2006PG845 (Fig. 1).

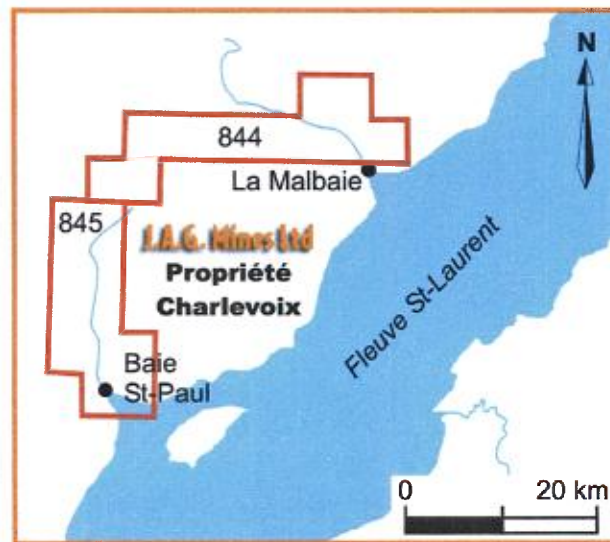


Figure 1. Localisation de la propriété Charlevoix, Les Mines **JAG** Ltée.

2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET TRAVAUX ANTÉRIEURS

La propriété Charlevoix couvre des roches sédimentaires paléozoïques qui sont demeurées sur le socle précambrien, après l'érosion régionale dans les parties les plus effondrées de la plateforme autochtone des Basses-Terres du Saint-Laurent, juste au nord de la limite des roches sédimentaires allochtones du front des Appalaches (Fig. 2). Cette zone est caractérisée par la présence d'un cratère d'impact météoritique d'âge Dévonien¹, vieux d'environ 350 Ma, qui a causé un effondrement marqué du socle et de la plateforme (fig. 3).

Les roches sédimentaires siliciclastiques et les calcaires des Basses-Terres du Saint-Laurent ont été déposés au Paléozoïque (Ordovicien) sur le socle cristallin d'âge protérozoïque de la province de Grenville. D'autres séquences de roches sédimentaires ordoviciennes ont ensuite été juxtaposées sur cet ensemble lors de l'orogène appalachien (affleurant au sud à l'Île-aux-Coudres).

Des roches sédimentaires de la plateforme paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent sont localement préservées à l'intérieur de grabens et de demi-grabens développés lors de la sédimentation ou lors de l'impact météoritique et plus particulièrement le long des rivières Malbaie et du Gouffre, zones sur lesquelles sont centrées les permis de la propriété Charlevoix.

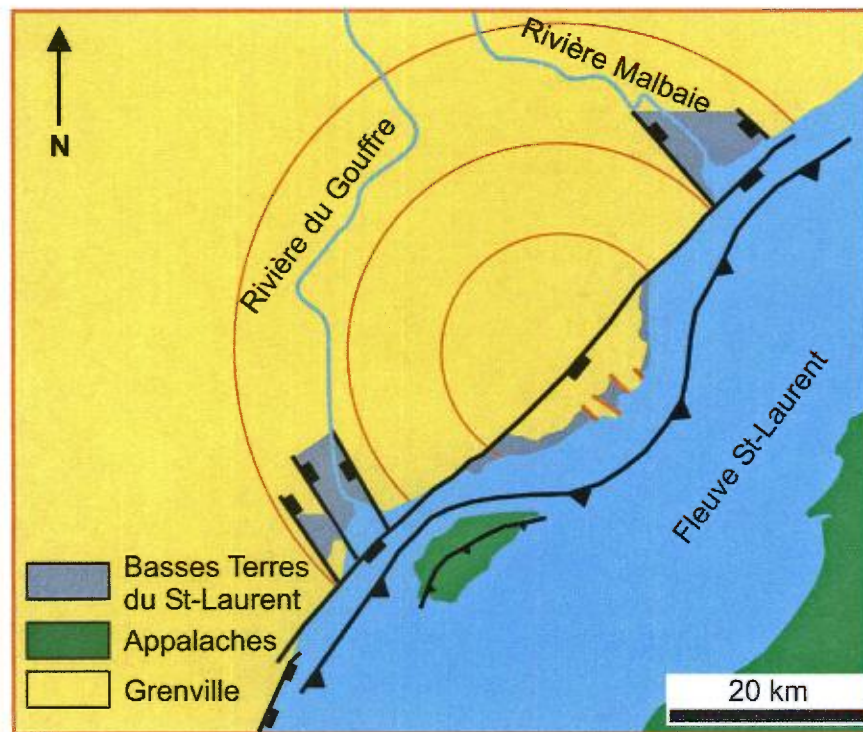
JAG cherche ici à explorer le potentiel en hydrocarbures de ces séquences de roches sédimentaires préservées de l'érosion et qui seraient semblables à celles retrouvées ailleurs dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, un bassin dans lequel ont été découverts et exploités les gisements de gaz naturel de St-Flavien et de Pointe-du-Lac.

2.1. STRATIGRAPHIE DE LA RÉGION DE CHARLEVOIX

Dans la région de Charlevoix, les roches siliciclastiques des formations de Cap-aux-Oies (non datée) et de Cap-à-l'Aigle (Ordovicien moyen) sont surmontées d'une séquence de calcaires, incluant des roches du Groupe de Black River, de la Formation Deschambault et du faciès de la Rivière du Moulin, elle-même recouverte des roches siliciclastiques à grains fins des Formations St-Irénée et Lotbinière (Fig. 4).

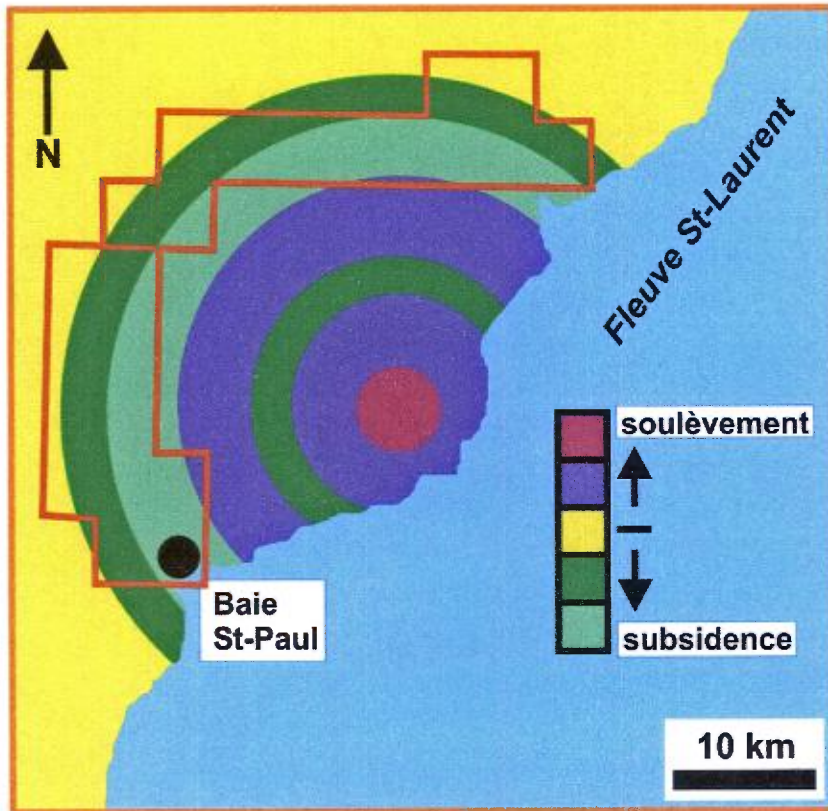
La Formation Cap-aux-Oies recouvre en discordance le socle précambrien et son épaisseur varie de 0 à 30 m, alors que celle de la Formation Cap-à-l'Aigle atteint localement plus de 80 m (Fig. 4). Les roches calcaires de la partie médiane ne forment pas de section continue dans la région, mais

leur épaisseur atteint plus de 175 m près de la rivière du Gouffre et possiblement plus, car la profondeur des grabens de la région demeure inconnue à ce jour.

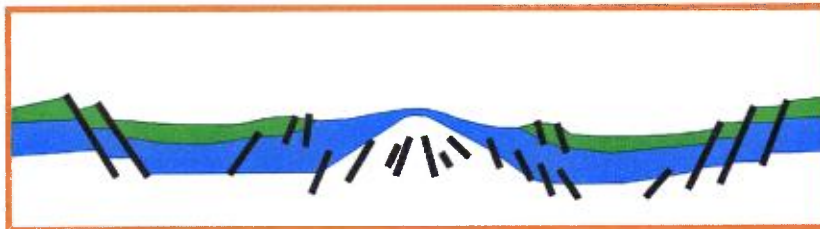


Modifié de Lemieux et al. (2003)

Figure 2. Géologie de la propriété Charlevoix, Les Mines JAG Ltée (Laroche et Richer-LaFlèche, 2006).



Géomorphologie structure d'impact de Charlevoix



Modifié de Lemieux et al. (2003)

Figure 3. Géomorphologie de la propriété Charlevoix, Les Mines JAG Ltée (Laroche et Richer-LaFlèche, 2006).

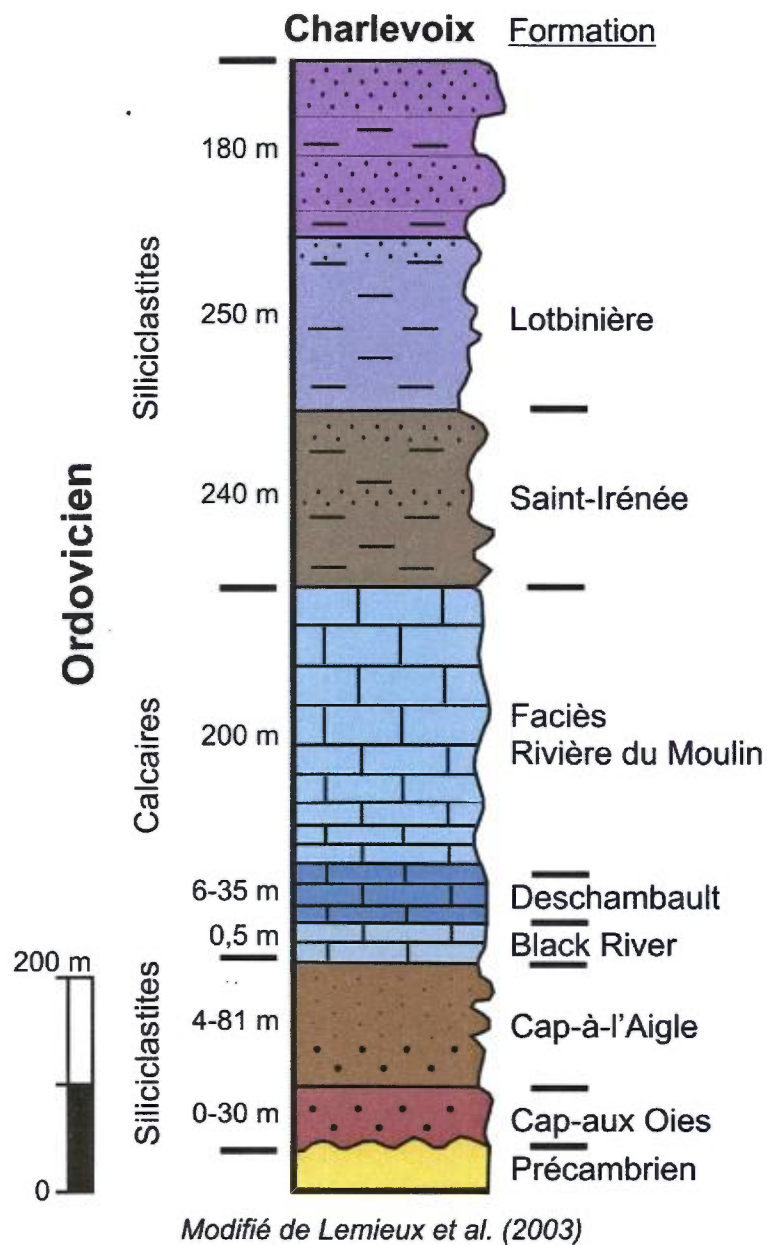


Figure 4. Stratigraphie de la propriété Charlevoix, Les Mines JAG Ltée (Laroche et Richer-LaFlèche, 2006).

2.2. CARACTÉRISTIQUES DES UNITÉS PÉDOLOGIQUES ET QUATERNAIRES PRÉSENTES DANS LES PÉRIMÈTRES ÉTUDIÉS.

Les figures 5 et 6 présentent des cartes pédologiques tirées du rapport de Carrier (1981). Ces cartes montrent les grands ensembles pédologiques et quaternaires observés dans et au voisinage des périmètres sud et nord de la région de Baie-St-Paul. Ces informations sont pertinentes car la variabilité observée dans les données magnétométriques et de conductivité électrique est principalement contrôlée par la nature et l'épaisseur des dépôts de surface (sols et sédiments anciens).

2.2.1. Secteur sud de Baie-St-Paul

La carte de la figure 5 montre une grande variabilité dans la distribution des sols et sédiments de surface. Dans ce secteur, le socle rocheux n'affleure pas dans la partie basse de la vallée. Toutefois, il est présent à certains endroits dans les coteaux, de part et d'autre de la baie, et en bordure de chemins et de certains ruisseaux. Dans la partie basse et centrale de la vallée, les unités de surface sont essentiellement marines et caractérisées par la présence de sédiments mis en place en mer profonde (argiles lourdes) ou dans un contexte littoral (argiles limoneuses ou sableuses) (Fig. 5). Ces dépôts sédimentaires sont localement recoupés par des cours d'eau et des alluvions ce sont formées en bordure ou à l'embouchure de ces derniers. La partie ouest de la rivière du Gouffre contraste d'avec la partie est par la présence d'une importante unité sableuse (Fig. 5). Les flancs situés plus en altitude de la vallée sont occupés par des tills de fond (côté est) et ou des dépôts fluvio-glaciaires du côté ouest.

2.2.2. Secteur nord de Baie-St-Paul

La carte de la figure 6 montre également une grande variabilité dans la distribution spatiale des sols et sédiments de surface du nord de Baie St-Paul. Dans ce secteur, le socle rocheux n'affleure pas dans la partie basse ni près de la rivière du Gouffre. Dans les coteaux, de part et d'autre de la baie, le roc affleure en bordure des chemins et de ruisseaux et sur des terres agricoles situées plus en altitude. Dans les parties basse et centrale de la vallée, les unités de surface sont surtout marines et caractérisées par des sédiments mis en place en mer profonde (argiles lourdes) ou dans un contexte littoral (argiles limoneuses ou sableuses) (Fig 6). Les terrains bordant la rivière du Gouffre sont

fortement érodés et montrent en plus des unités sédimentaires issues de grands glissements de terrain. Ces dépôts, surtout présents du côté ouest de la rivière du Gouffre, sont caractérisés par la présence de buttes de sable (ou sable graveleux) alternant avec des dépressions ou milieux humides (Fig. 6).

Dans ce secteur, en altitude, les dépôts observés sont essentiellement glaciaires et constitués de tills de fond. En altitudes intermédiaires et à l'est du chemin St-Laurent, des dépôts fluvio-glaciaires constitués de loams sablo-caillouteux sont présents.

Carte pédologique secteur Sud de Baie-St-Paul

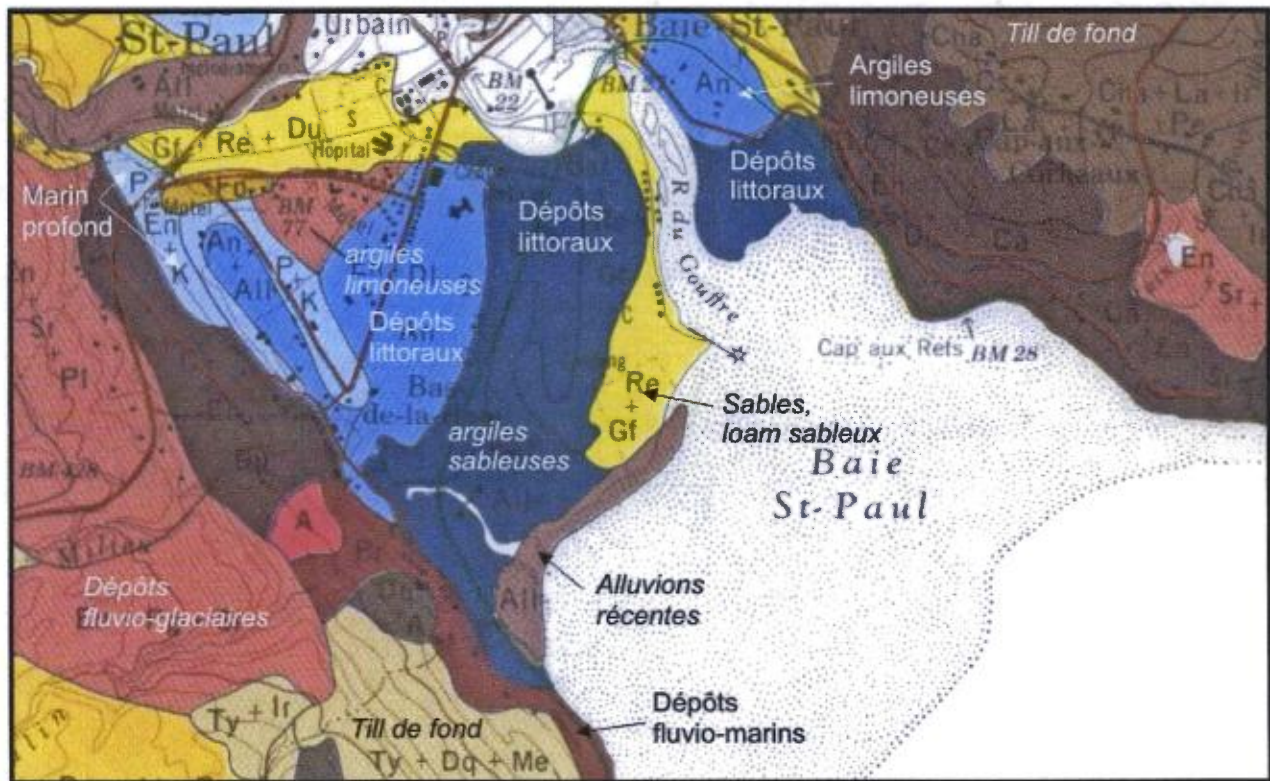


Figure 5. Carte pédologique modifiée contenant des informations supplémentaires sur la nature des substrats quaternaires de la région de Baie-St-Paul et plus spécifiquement de la partie sud de la ville de Baie-St-Paul. La carte montre la position de l'estuaire de la rivière du Gouffre et l'estrans de la baie. (carte modifiée de Carrier, 1981).

2.2. TRAVAUX ANTÉRIEURS

Très peu de travaux d'exploration en hydrocarbures ont été effectués dans la région de Charlevoix sur la propriété détenue par JAG.

Vers la fin des années 1980, la compagnie GHK (Oklahoma, EUA) a mandaté les firmes Barringer Geoservices inc. et Geochemical Survey inc. pour réaliser un levé géochimique de sols. Les contenus en hydrocarbures volatils et extractibles, en CO₂ et en He ainsi que les teneurs en métaux indicateurs de la présence de pétrole (ex. V, Co, Ba) ont alors été mesurés sur 450 échantillons de sols. On a alors constaté la présence de zones fortement anormales en méthane et en hélium au voisinage des formations calcaires du secteur². La forte corrélation entre le méthane et l'hélium dans ces zones suggère une origine profonde du gaz (thermogénique) par opposition à une origine pédogénique qui aurait pu être reliée à la dégradation de la matière organique provenant de la végétation.

Par ailleurs, des poches de gaz auraient été intersectées dans un puits creusé dans le secteur de la rivière du Gouffre en 1961³. Le puits d'une profondeur de 267 pieds a été interrompu dans une zone de mort terrain où alternaient des argiles et du sable. Selon le propriétaire de la ferme Tremblay, ce forage aurait été implanté dans la zone de transition entre la haute batture et la terre agricole de la ferme Tremblay située du côté est de la rivière du Gouffre. Les auteurs du rapport de forage suggèrent qu'une structure anticlinale possiblement faillée et affectant des roches carbonatées puisse être présente sous les dépôts quaternaires à cet endroit.

L'étude du potentiel pétrolière des roches sédimentaires de la région de Baie-St-Paul et de la Malbaie (Camiré et Richer-LaFlèche, 2007) a démontré que la matière organique contenue dans les calcaires est principalement d'origine marine. Cette étude a de plus démontré que les calcaires ont atteint le degré de maturation de la fenêtre à huile et que le tiers des calcaires analysés ont un contenu en carbone organique total (COT) supérieur à 0,5 %pd, suggérant un potentiel roche-mère bon à très bon pour des échantillons de calcaire.

2.4 GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE ET PÉDOLOGIE

La géologie du Quaternaire est très complexe dans la région de Baie-St-Paul. Le dernier évènement glaciaire a fortement modelé la physiographie en accentuant le dénivelé topographique par endroit et en déposant une grande quantité de sédiments glaciaires et fluvio-glaciaires dans la vallée. Suite à l'enfoncement isostasique de la lithosphère par le poids de la glace et à la fonte de la calotte glaciaire continentale la région a été affectée par une importante transgression marine qui a laissée une quantité importante de dépôts sédimentaires marins argileux et silto-argileux au fond de la vallée.

Selon Dionne (1979), le début de l'invasion marine dans ce secteur daterait de 12500 à 12000 ans BP. Dans un premier temps, une phase glacio-marine de 500 à 1500 ans aurait favorisé la formation de hauts deltas. Une phase transgressive d'une durée de 2000 à 3000 ans aurait par la suite affectée le secteur. Cette phase a été suivit d'une période régressive de la mer ayant débuté vers 9000 à 8000 ans BP. Le niveau maximum atteint par la mer serait de 190m avant la phase St-Narcisse et de 150m par la suite. Dans la région, les différentes étapes de remontées isostasiques du continent sont marquées par une succession de terrasses marines d'altitudes variées.

2.4.1 La vallée de la rivière du Gouffre

La vallée de la rivière du Gouffre suit une orientation grossièrement nord-sud dans la région de Baie-St-Paul et St-Urbain malgré la nature méandreuse de la rivière qui façonne le fond de la vallée. Cette rivière, qui prend sa source au lac des Cœurs dans le parc des grands Jardins à 823 m d'altitude, s'écoule sur une distance de 71 km avant de rejoindre le fleuve St-Laurent.

La vallée s'élargie considérablement vers son embouchure près du fleuve St-Laurent (Fig. 7). Les parois de la vallée sont généralement très abruptes en raison de la tectonique et des processus quaternaires ayant affectés le secteur. Plus spécifiquement, la vallée fait partie du graben du Gouffre qui est une structure d'effondrement responsable en partie de la préservation des séquences ordoviciennes de roches calcaires et siliciclastiques dans la région.

Le long de la rivière du Gouffre, les sédiments marins ont été fortement remaniés par une multitude de glissement de terrain. Ces coulées sont observées jusqu'à une altitude de 145m. Les sédiments de

la vallée du Gouffre sont caractérisés par de grandes discontinuités latérales et verticales. Les glissements de terrain sont responsables en grande partie de ces perturbations. Deux familles de mouvements de terrain ont été observées le long de la vallée. La première regroupe des coulées de grandes superficies qui ont régressées jusqu'aux parois rocheuses de la vallée. Les vestiges de ces coulées sont visibles sur le terrain par la formation de crêtes arquées alignées. Les planchers de ces coulées montrent localement la présence de petits lacs ou milieux humides (Lajoie, 1981). Au nord de la ville de Baie-St-Paul, ces milieux humides sont visibles dans la partie centre sud du périmètre nord indiqué sur la figure 13.

Le second type de mouvement de terrain correspond à des structures localisées en bordure de la rivière actuelle. Ces coulées sont de nature superficielle et géographiquement restreintes. Elles sont surtout observées du côté concave (secteur en érosion) des méandres de la rivière du Gouffre.

Lajoie (1981) rapporte 3 datations ^{14}C de débris forestiers ensevelis dans les dépôts de coulées du secteur. Ces âges sont 340 BP, 2500 BP et 3170 BP. Selon des travaux du Centre d'Études Nordiques de Québec, certains de ces mouvements de terrain ont possiblement été déclenchés par l'activité sismique particulièrement importante dans cette région. En particulier, la datation de 340 BP correspond au grand tremblement de terre rapporté par les Jésuites. Ce dernier aurait eu lieu le 5 février 1663 à 5h30 pm. Il serait responsable de grands glissements de terrain observés dans la vallée du Gouffre et aux Éboulements (Charlevoix). La Commission géologique du Canada a évalué ce séisme historique à une magnitude de 7.

Selon Chagnon (1969) quelques lambeaux de terrasses marines, accrochés au socle rocheux, sont demeurés intacts. Une altitude maximale de 175m a été fixée comme limite pour l'observation de sédiments marins quaternaires dans cette région.

Des travaux de sismique réfraction à faible pénétration (de type géotechnique), réalisés dans la partie centrale de la vallée, suggèrent la présence d'une épaisseur de plus de 90m de sédiments au dessus du roc (Lajoie, 1981). Ceci explique pourquoi nous n'avons pas observé d'affleurements rocheux en bordure de la rivière lors des travaux de géophysiques. De plus, trois petits forages géotechniques implantés par le MRN du Québec (à une altitude d'environ 10m par rapport au niveau de la mer) ont intersectés plus de 20m de sédiments sans rencontrer le roc. Ces observations sont pertinentes pour l'interprétation des données géophysiques contenues dans ce rapport car le socle

rocheux est probablement présent à de grandes profondeurs sous les sédiments quaternaires et les alluvions récentes de la rivière. En conséquence, la signature géophysique des dépôts de surface (propriétés pétrophysiques) devrait fortement influencer les données des levés magnétique et de conductivité électrique.

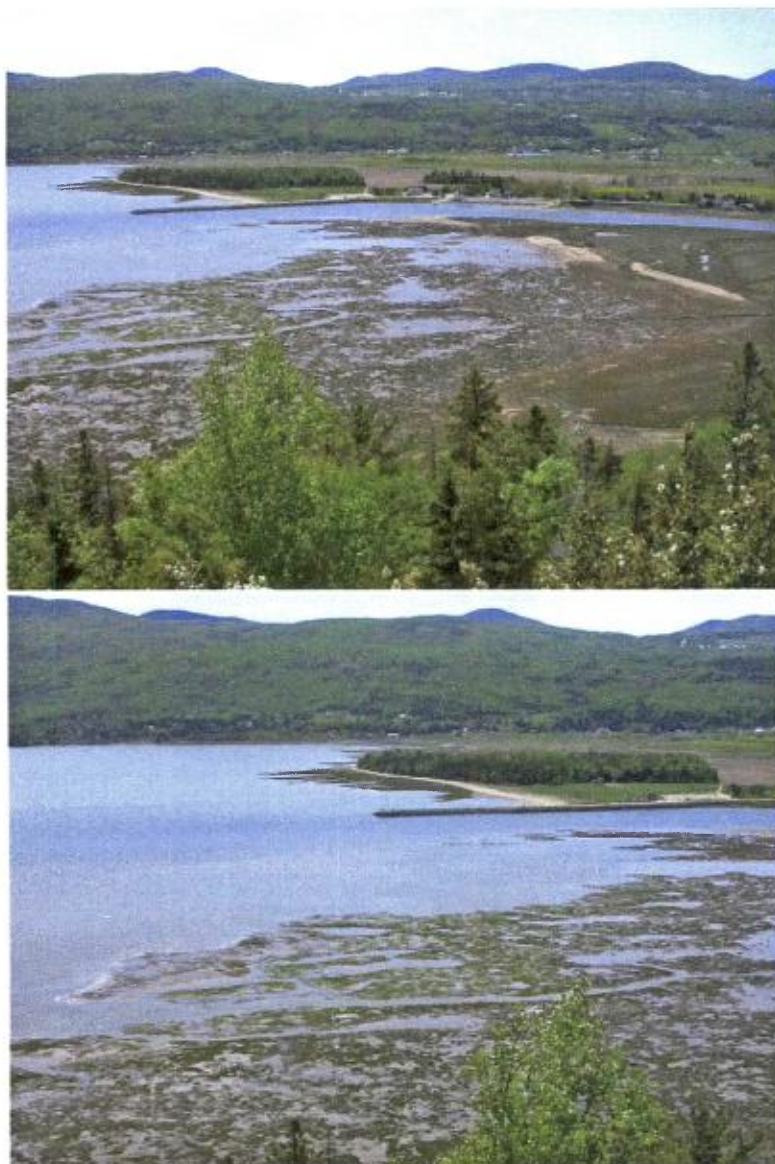


Figure 7. Photographies montrant l'estuaire de la rivière du Gouffre et l'estran lors de la marée montante. Vue vers l'ouest à partir de l'observatoire de la route 362.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 LEVÉ MAGNÉTOMÉTRIQUE

Le levé magnétométrique est une méthode géophysique sensible aux variations de la susceptibilité magnétique que l'on devrait normalement observer entre les différentes formations géologiques et pédologiques de la propriété Charlevoix. Par exemple, ces unités peuvent montrer des variations dans les proportions modales de magnétite, goethite et d'hématite pouvant se traduire par des contrastes de susceptibilité magnétique. Si ces matériaux sont présents en quantités suffisantes, ces contrastes devraient se traduire par des variations significatives du champ magnétique total.

Dans ce projet, nous avons utilisé un magnétomètre-gradimètre de type GSM-19 (v 7.0) de type *walking mag and grad* (GEM Systems) couplé à un DGPS sub-métrique (non-magnétique) (Fig. 8). L'appareil utilisé est un modèle de nouvelle génération permettant l'obtention de 5 données par seconde (environ 65 données par 12,5m) par opposition aux levés géophysiques classiques ne fournissant qu'une donnée au 12,5 m. 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.

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 1 m au dessus du premier. L'utilisation simultanée de deux capteurs superposés permet de calculer la différence des deux signaux, usuellement nommé 'pseudogradient'. Ce paramètre est indépendant des variations temporelles du champ magnétique terrestre. Ainsi, l'approche gradiométrique est une méthode qui permet de visualiser directement les données

magnétiques sans devoir effectuer de corrections pour les fluctuations diurnes du champ magnétique terrestre. Les données gradiométriques peuvent être comparées d'une zone à l'autre.

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. Ces données ont été utilisées pour corriger les fluctuations reliées aux variations diurnes du champ magnétique terrestre. L'examen des banques de données a permis de constater qu'aucune tempête magnétique significative n'a perturbée la qualité des données magnétométriques.

Dans des conditions idéales, la sensibilité de l'appareil est de 0,01 nT et en fonction d'écart considérables de température cette sensibilité peut atteindre 0,2 nT.



Figure 8. Magnétomètre utilisé pour le levé géophysique sur la propriété Charlevoix (secteur de Baie-St-Paul).



Figure 9. Acquisition de données géophysiques en véhicule tout terrain (véhicule Argo sur chenilles). La photo du bas montre la remorque en aluminium utilisée pour le levé magnétométrique mobile.

3.2 LEVÉ DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE PAR INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

L'utilisation de sondes d'induction électromagnétique permet de mesurer les contrastes de conductivité électrique des différentes unités géologiques ou pédologiques sans nécessiter l'utilisation d'électrodes implantées dans le sol ou la manipulation de longs câbles électriques. Ceci permet de cartographier un très large territoire dans un délai raisonnable. Notez qu'en fonction de la fréquence d'induction, ces conductivimètres peuvent mesurer des signaux provenant de profondeurs variables.

3.2.1 Levé de conductivité électrique (sonde GEM-2)

Nous avons réalisé un levé de conductivité électrique à l'aide d'une sonde GEM-2 de *Geophex* (Fig. 10). Cette sonde a la particularité de pouvoir émettre plusieurs fréquences simultanément (de 300Hz à 96000Hz) et de mesurer simultanément les champs magnétiques secondaires associés à la circulation de courants de Foucault dans le sol. Cette caractéristique permet théoriquement d'investiguer des profondeurs variables des matériaux présents en sub-surface. Ainsi, les faibles fréquences d'induction pénètrent plus profondément et les hautes fréquences plus superficiellement. Dans le cas présent, nous avons choisi trois fréquences d'induction électromagnétique (630 Hz, 1830 et 4530 Hz). Dans ce rapport, nous utiliserons les termes basse fréquence, fréquence intermédiaire et haute fréquence pour décrire respectivement les fréquences d'induction électromagnétique de 630, 1830 et 4530 Hz.

La sonde GEM-2 est compacte et légère. La distance entre l'émetteur T_x et le récepteur R_x est seulement de 1,83 m. La sonde GEM-2 possède un port de communication DB9 (RS232) permettant l'acquisition d'un signal GPS simultanément à l'enregistrement des données instrumentales. Dans le meilleur des cas, la sonde GEM-2 peut acquérir les données à une fréquence de 30 Hz (jusqu'à 30 mesures par seconde). Dans le cas présent nous avons augmenté le nombre d'itérations pour chaque mesure ($n=6$) ce qui augmente la stabilité du signal mesuré par la sonde. Ainsi, lors des levés à Baie St-Paul, la sonde GEM2 mesurait une valeur au 1/4 de seconde (4 Hz).

En fonction de la résistivité des sols, sédiments et roches observées dans la région de Baie-St-Paul, la sonde GEM-2 devrait permettre une investigation de la sub-surface à environ 20 m de profondeur (*théoriquement 50 m dans des formations très résistives selon le fabricant Geophex, USA*).



Figure 10. La sonde d'induction électromagnétique GEM-2 multifréquences couplée à un système de positionnement DGPS sub-métrique.

La figure 11 montre la remorque en bois utilisée pour le levé de conductivité électrique en mode d'acquisition mobile. La boîte de transport ne contient aucune structure métallique pouvant interférer avec la mesure des données. En tout temps, l'équipement de mesure de la conductivité électrique et le GPS ont été maintenus à l'abri de la poussière et de la pluie. Ce point est important pour assurer la qualité des données et surtout pour minimiser les bris instrumentaux.



Figure 11. Remorque de l'INRS-ÉTÉ utilisée pour le levé de conductivité électrique mobile (Sonde GEM2 de Geophex et DGPS Max de *CSI-Hemisphere inc.*).

3.3 LOCALISATION DES PÉRIMÈTRES DE LEVÉS GÉOPHYSIQUES RÉALISÉS DANS LA RÉGION DE BAIE-ST-PAUL

3.3.1 Secteur Sud de Baie-St-Paul (périmètre sud)

La figure 12 montre le périmètre des levés géophysiques réalisés dans le secteur sud de Baie-St-Paul. Ce périmètre couvre le secteur agricole et une partie des battures situées au sud de la ville. Les terrains ayant fait l'objet du levé sont principalement de type agricole. L'extrémité sud du périmètre est constituée d'une haute batture, occasionnellement inondée aux très hautes marées, et d'une partie de l'estran (batture inférieure). Notez que plusieurs lignes d'acquisition en chenillette ont été réalisées à marée basse sur l'estran de Baie-St-Paul. Nous n'avons pas acquis de données de conductivité électrique dans ce secteur en raison de la présence de sédiments saturés d'eau de mer qui résultent en des données de conductivité électrique extrêmement élevées et hors du domaine de calibration du conductivimètre utilisé.

Notez que l'estran du côté est de la rivière du Gouffre est impraticable en véhicule motorisé en raison du type de drainage accidenté et de nombreux chenaux d'érosion. De plus, ce secteur est extrêmement vaseux. L'estran ouest est plus silteux ce qui permet une circulation en chenillette (ARGO) avec toutefois certaines précautions.



Figure 12. Localisation du périmètre de levés géophysiques situé au sud de Baie-St-Paul (périmètre sud).

3.3.2 Secteur Nord de Baie-St-Paul (périmètre nord)

La figure 13 montre le périmètre nord des levés géophysiques réalisés dans le secteur nord de Baie-St-Paul. Ce secteur couvre un secteur essentiellement agricole qui borde l'extrémité nord de la ville entre le boulevard Mgr de Laval et le chemin St-Laurent. La partie centrale du périmètre est occupée par une importante dépression topographique reliée à la présence de la rivière du Gouffre. Notez que dans le passé, de nombreux glissements de terrain ont affectés les terrains situés en bordure de cette rivière. Lors des travaux de terrain nous avons observé du côté est de la rivière de nombreuses fissures d'extension précurseurs d'éventuels glissements de terrain.

L'équipe de terrain n'a pas observée d'affleurements rocheux en bordure de la rivière. Le bord de la rivière contient une quantité importante d'alluvions récentes localisées à faible altitude.



Figure 13. Localisation du périmètre de levés géophysiques situé au nord de Baie-St-Paul (périmètre nord).

3.4 DISPOSITIF DE LIGNES ET CONTRAINTES DE TERRAIN

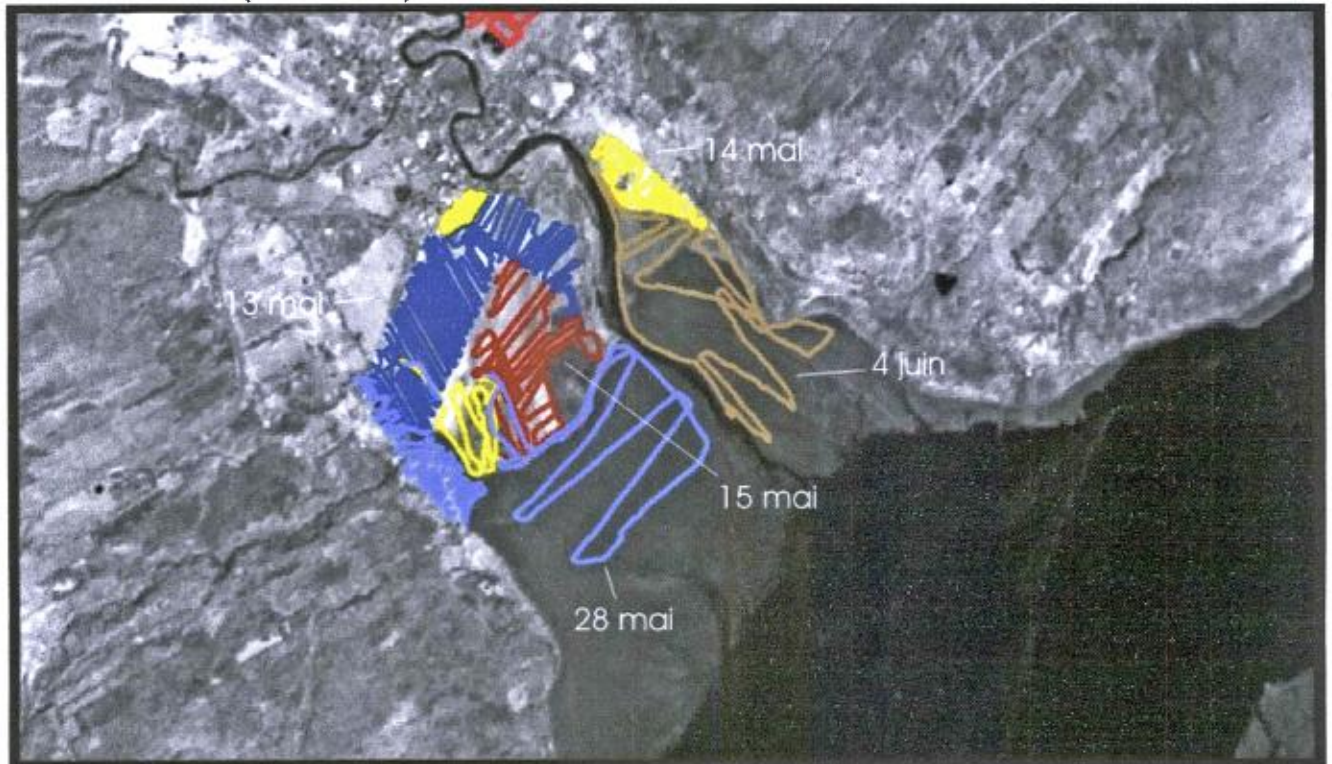
3.4.1 Périmètre sud

Plusieurs obstacles ou éléments pouvant perturber les données magnétométriques ou de conductivité électrique sont présents dans la partie sud du village de Baie-St-Paul. Lors des levés sur les terres agricoles, nous avons maintenu une distance de 30m par rapport aux clôtures métalliques bordant les propriétés agricoles. De plus, nous n'avons pas fait d'acquisitions en bordure du chemin de fer ou de lignes de transport électrique. Les levés ont de plus été arrêtés à 30 m des propriétés résidentielles situées à l'extrémité des terres agricoles.

Lors de l'acquisition des données sur l'estran ouest nous n'avons pas observé d'objets métalliques ou autres résidus pouvant nuire à l'interprétation du levé magnétométrique. Cependant, il est probable que des objets relativement anciens soient enfouis dans ce secteur car de l'activité navale y est répertoriée depuis le 17^{ième} siècle. De plus, lors des travaux nous avons croisé une équipe archéologique l'Université de Montréal (Pr. Brad Leuwan) travaillant sur les vestiges d'une ancienne seigneurie dont les fondations des bâtiments sont remarquablement bien préservées sous le sol agricole de la ferme des Fillion.

Le tracé des lignes d'acquisition du levé magnétométrique est indiqué sur la figure 14 et celui du levé de conductivité électrique sur la figure 15.

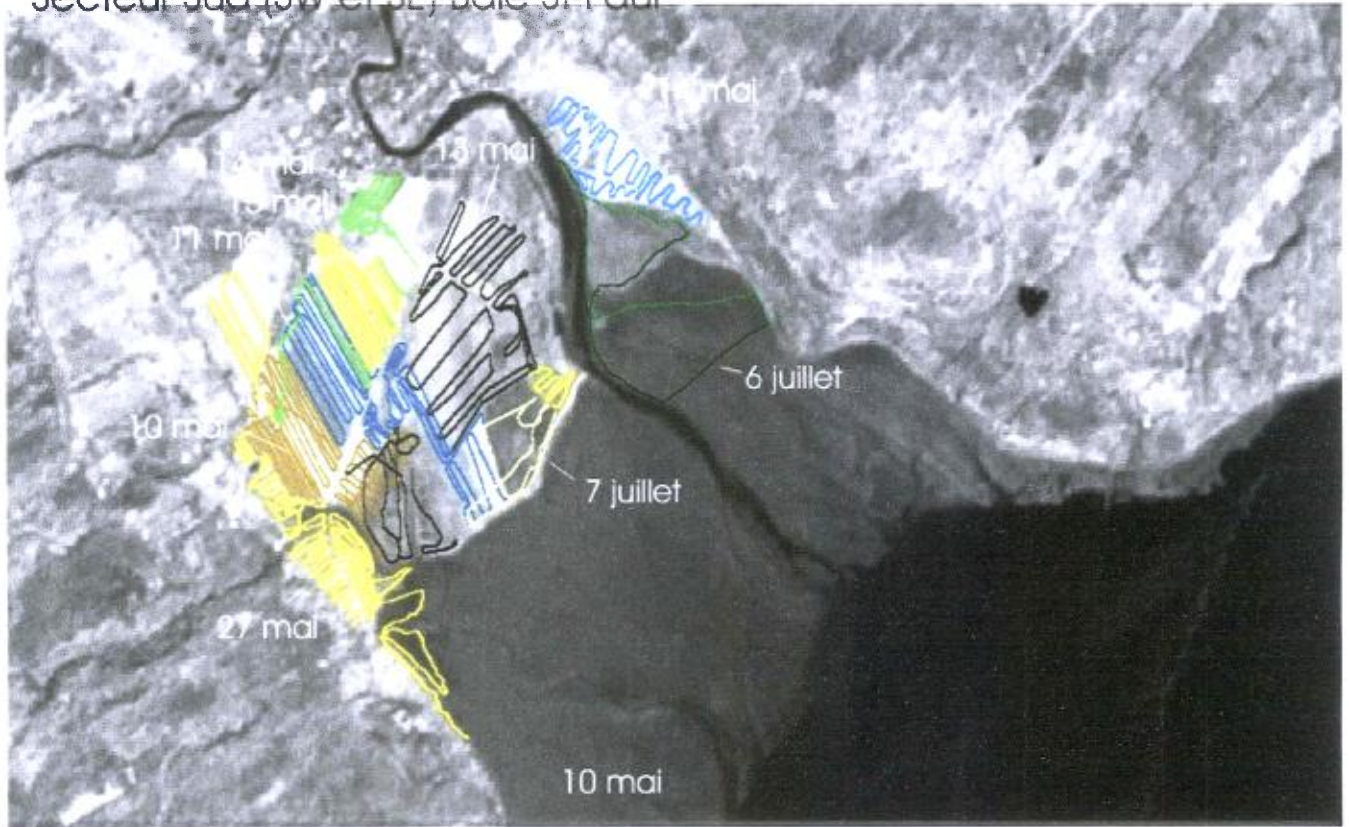
Secteur Sud (SW et SE) Baie St-Paul



Levé magnétométrique

Figure 14. Dispositif de lignes du levé magnétométrique réalisé dans la partie sud de Baie-St-Paul. Les lignes relativement espacées, réalisées le 28 mai et le 4 juin, passent sur l'estran et ont été acquises à marée basse.

Secteur Sud (SW et SE) Baie St-Paul



Levé de conductivité électrique

Figure 15. Dispositif de lignes du levé de conductivité électrique réalisé dans la partie sud de Baie-St-Paul (périmètre sud).

3.4.2 Périmètre nord

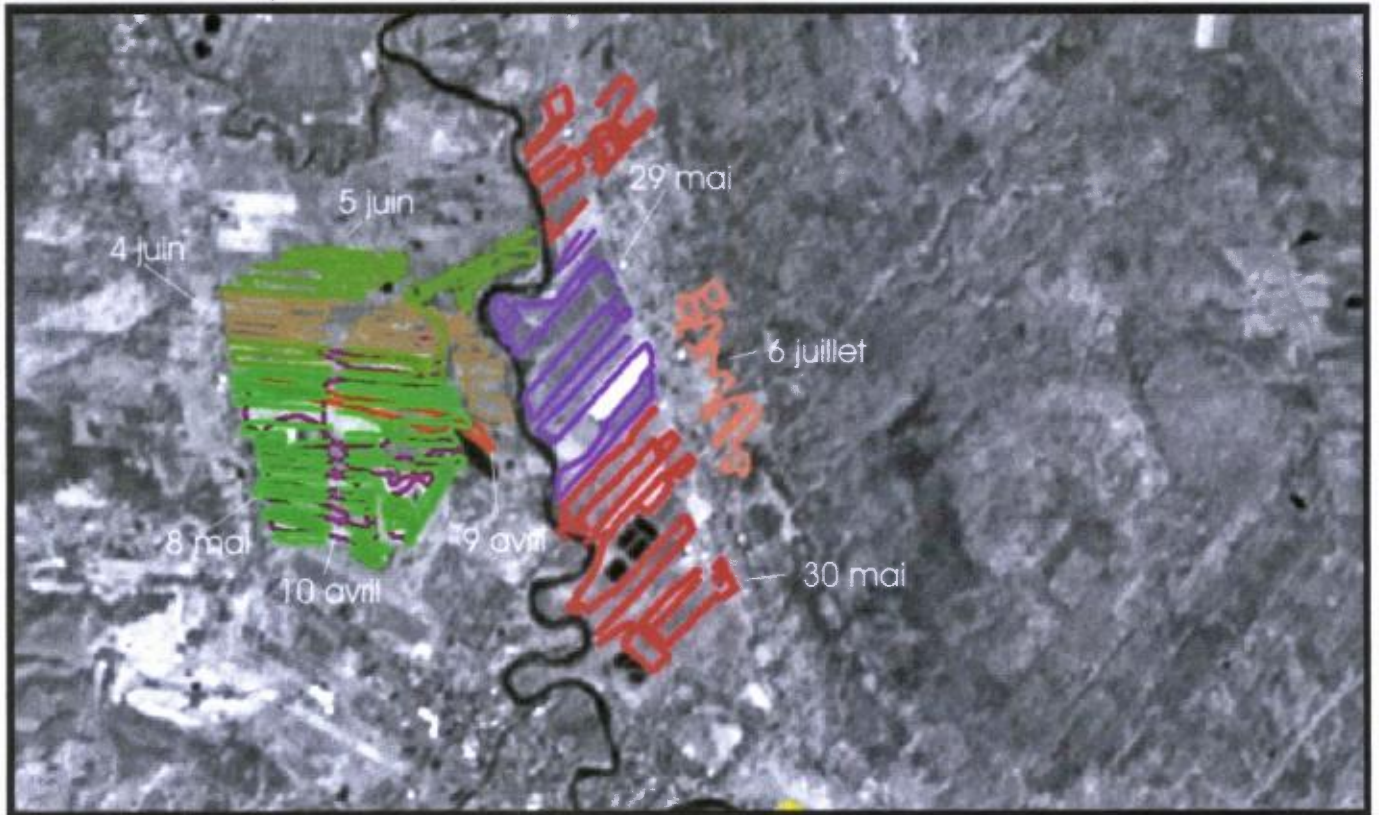
Plusieurs obstacles ou éléments pouvant perturber les données magnétométriques sont présents sur les terres agricoles de la partie nord du village de Baie-St-Paul. Lors des levés sur les terres agricoles nous avons maintenu une distance de 30m par rapport aux clôtures métalliques bordant les différentes propriétés agricoles. Les levés ont de plus été arrêtés à 30 m des propriétés résidentielles situées à l'extrémité ouest des terres agricoles. Plusieurs lignes électriques passent dans le secteur nord de Baie-St-Paul. L'impact de ces lignes sur les données magnétiques est majeur ce qui nous a obligé à augmenter la zone d'exclusion à 60m et localement 100m.

Les premiers travaux ont débuté en mars 2008 et à ce moment le couvert de neige était anormalement important et la faible portance de la neige ne permettait pas la circulation en motoneige ou chenillette. Les travaux ont donc repris au début avril avec cependant autant de neige au sol mais sous des conditions de température relativement chaudes (de 5 à 10°C). Ceci rendait la neige et le levé totalement impraticable. Les travaux ont donc repris en mai 2008 lorsque la neige fut complètement fondue. Les levés ont alors été réalisés à l'aide d'un VTT (*Artic Cat 500 cc*) pour ce qui est du conductivimètre *GEM-2* et de l'*Argo* sur chenilles pour ce qui est du levé magnétométrique. Pour éviter la destruction de plantes agricoles (céréales et autres), l'équipe a été obligée de terminer les travaux à pied.

Lors de l'acquisition de données dans ce secteur nous n'avons pas observé d'objets métalliques ou autres résidus pouvant nuire à l'interprétation des données magnétométriques. Toutefois, il est probable que des objets métalliques (déchets ?) aient été enfouis dans certaines parties des terres agricoles.

Le tracé des acquisitions du levé magnétométrique est indiqué à la figure 16 et celui du levé de conductivité électrique à la figure 17.

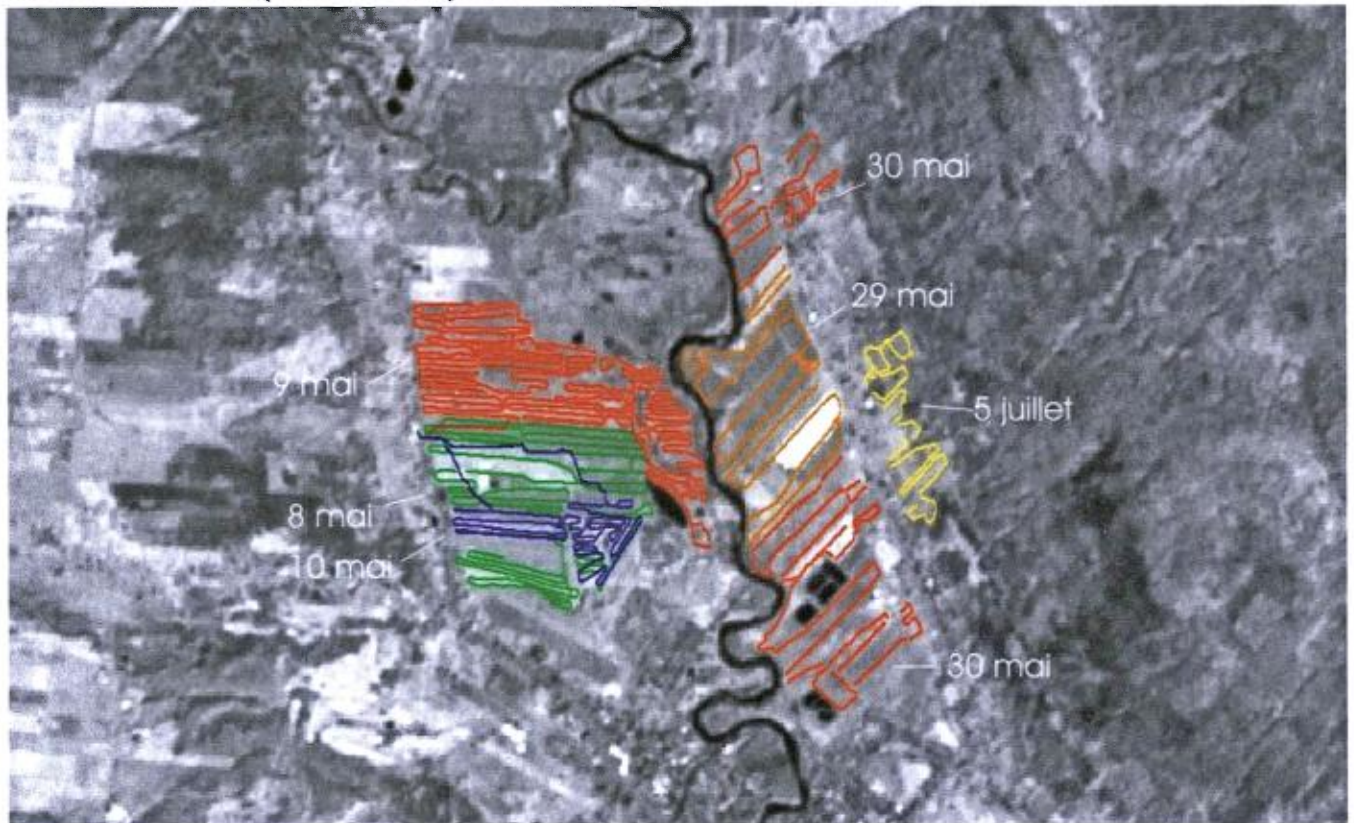
Secteur Nord (NW et NE) Baie St-Paul



Levé magnétométrique

Figure 16. Dispositif de lignes du levé magnétométrique réalisé dans la partie nord de Baie-St-Paul (périmètre nord).

Secteur Nord (NW et NE) Baie St-Paul



Levé de conductivité électrique

Figure 17. Dispositif de lignes du levé de conductivité électrique réalisé dans la partie nord de Baie-St-Paul (périmètre nord).

4. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

4.1. LEVÉS DANS LE PÉRIMÈTRE SUD

4.1.1. Levés magnétométriques

Les données des levés magnétométriques sont présentées séparément pour les périmètres situés au sud et au nord de la ville de Baie-St-Paul. Les données ont été corrigées pour la variation diurne du champ magnétique terrestre et filtrées par rapport au critère de qualité indiqué par le magnétomètre. Dans les levés réalisés à Baie-St-Paul, ce facteur diminuait considérablement au voisinage de lignes électriques et d'objets métalliques volumétriquement important. Les données corrigées sont présentées sous la forme d'un histogramme à la figure 18. Dans l'ensemble, le champ magnétique total varie de 54739 à 55284 nT avec une moyenne de 54951 nT et un écart-type de 85 nT.

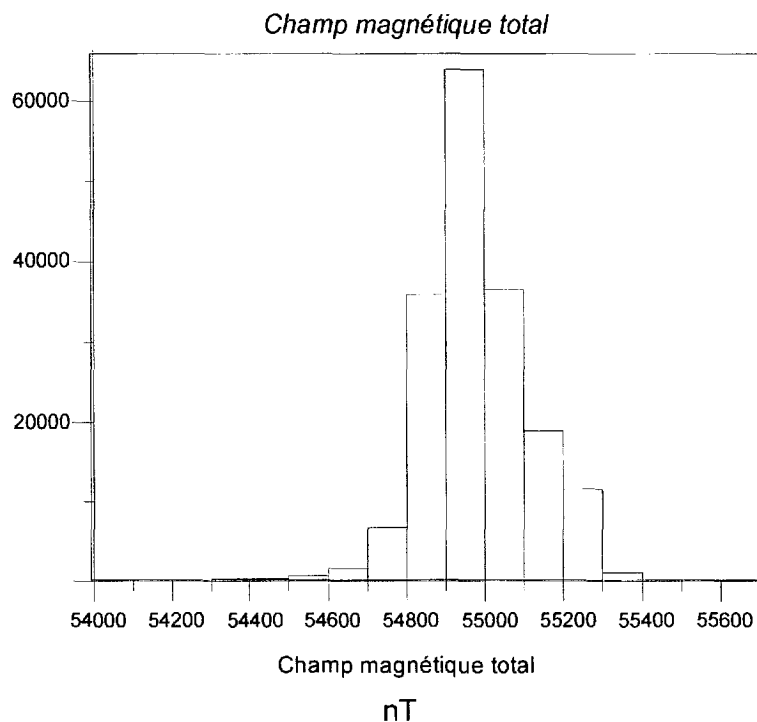


Figure 18. Histogramme des valeurs du champ magnétique corrigées pour la variation diurne et les perturbations anthropiques (câbles électriques, structures métalliques).

Les données des levés magnétométriques ont par la suite été krigées et plus d'un million de cellules ont ainsi été générées pour produire les cartes géophysiques représentées aux figures 19 et 20. La procédure géostatistique utilisée est décrite en détail dans l'annexe 1. Dans l'ensemble, les cartes de la figure 19 montrent de fortes différences dans l'intensité du champ magnétique total entre les périmètres nord et sud. De fortes valeurs du champ magnétique total sont observées dans la partie nord-ouest du périmètre nord tandis que pour le périmètre sud les variations sont relativement modérées. La partie est du périmètre nord montre une discontinuité nord-sud qui sépare un domaine plus magnétique à l'ouest d'un domaine moins magnétique à l'est.

Le périmètre sud possède deux anomalies magnétiques positives orientées grossièrement nord-sud ainsi que deux domaines de basses valeurs du champ magnétique total aux extrémités ouest et est du périmètre (Fig. 19). Notez que ces extrémités correspondent à la fin des battures et au début de la colline dans ces secteurs. Notez également que l'extrémité est du périmètre sud est caractérisé par la présence de falaises de calcaire. Ces roches sont normalement caractérisées par de très faibles susceptibilités magnétiques ce qui se traduit par de faibles valeurs de champ magnétique total.

La figure 20 montre des cartes krigées des valeurs du gradient magnétique mesurées par différence des valeurs du champ magnétique total mesurées entre les senseurs magnétiques du bas et du haut (distance de 1m entre les senseurs magnétiques). Ces données, exprimées en nT/m, sont particulièrement sensibles aux perturbations des sources relativement peu profondes. La carte du périmètre sud montre une zone de valeurs plus élevées orientée NO-SE (en jaune et orange sur la carte) bordée de zones à gradients négatifs (en vert sur la carte). En plus de grandes structures, la carte montre plusieurs petites anomalies gradiométriques circulaires et alignées dans l'espace (Fig. 20). Ces anomalies pourraient entre autres être associées à des halos d'altération reliés à la migration d'hydrocarbures vers la surface. Toutefois, cette interprétation devra être corroborée par des analyses de gaz (hydrocarbures C1-C4) dans les sols de ce périmètre.

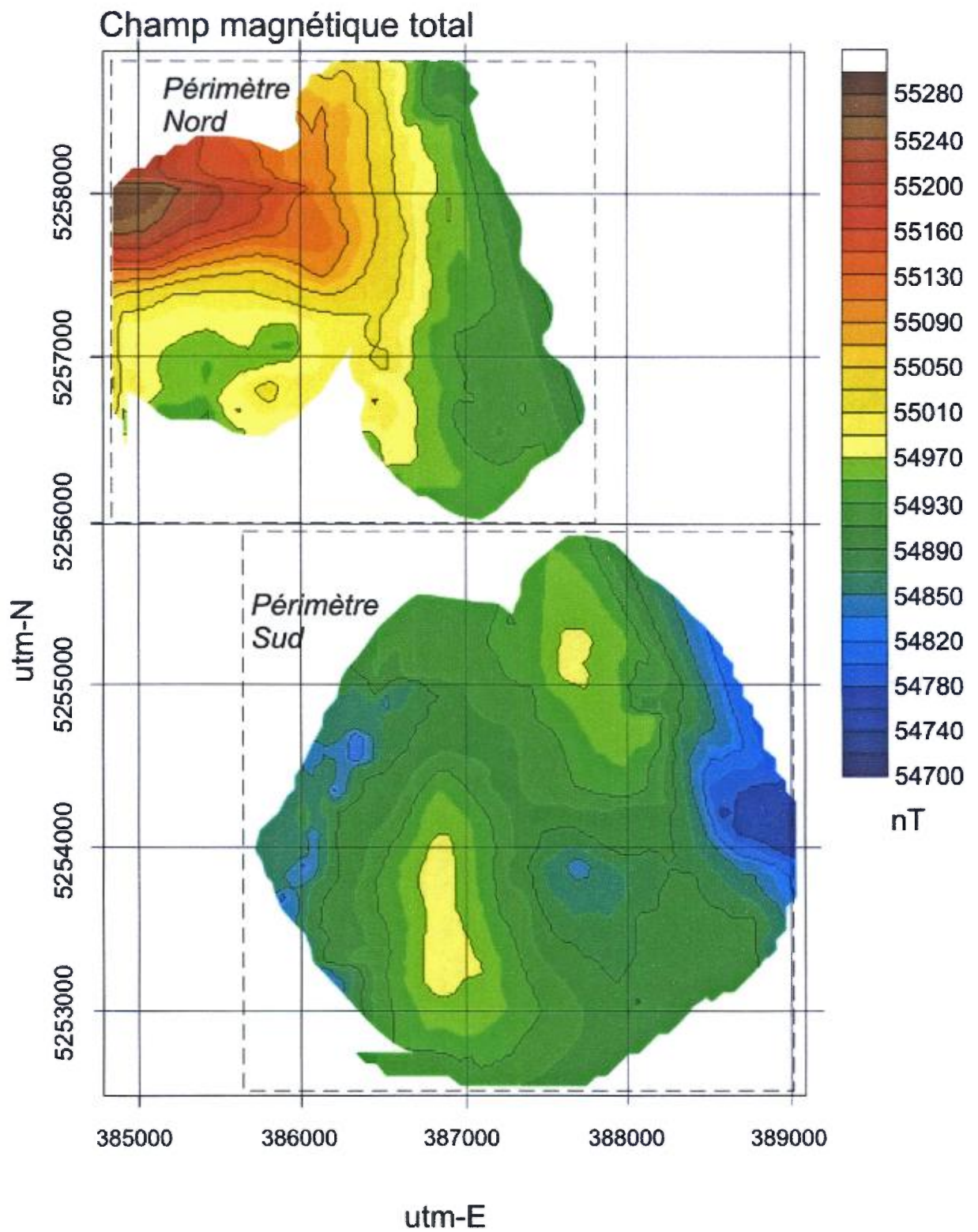


Figure 19. Carte des données krigées du champ magnétique total des périmètres nord et sud de Baie-St-Paul.

Carte du gradient magnétique

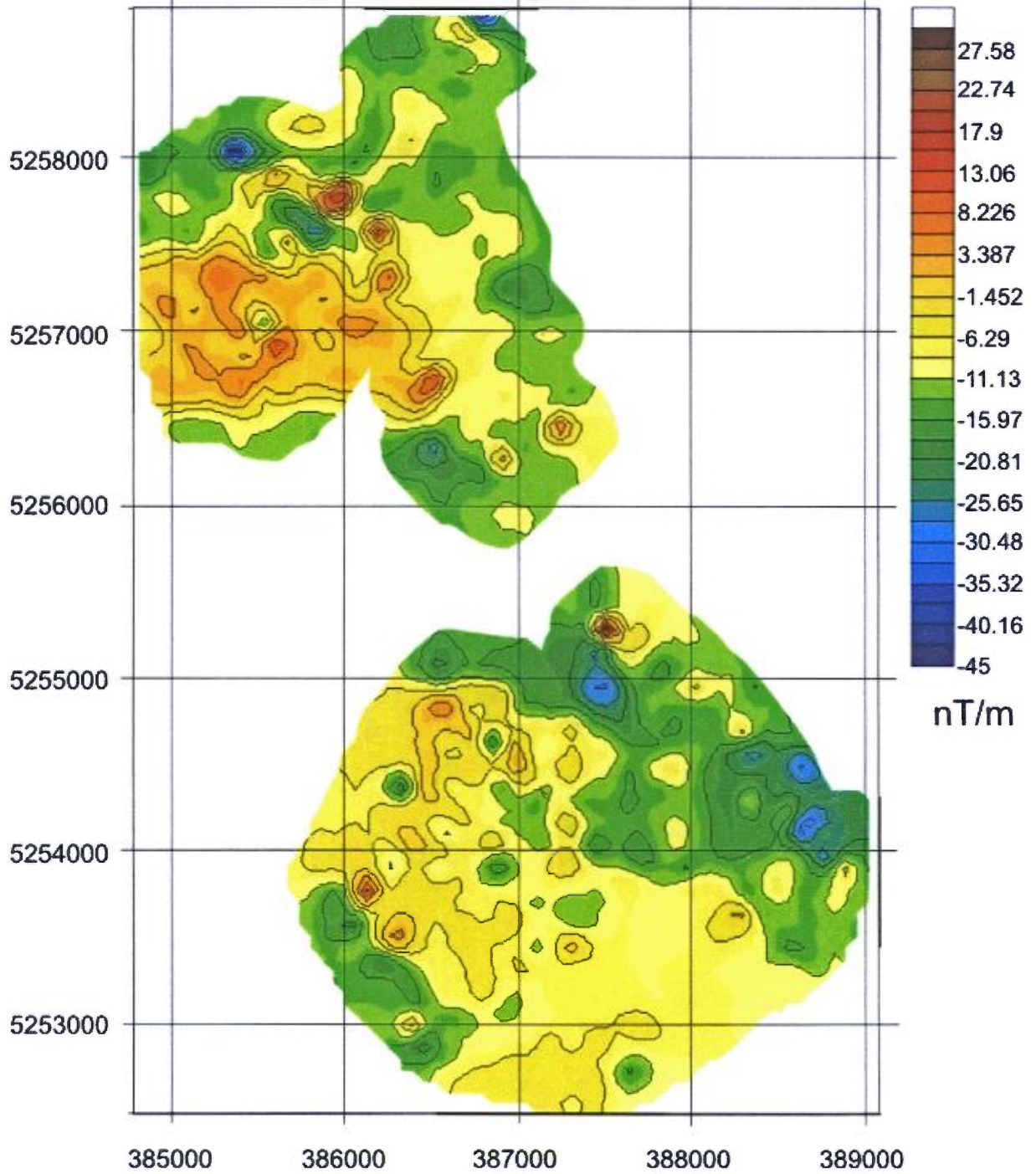


Figure 20. Carte des données krigées du gradient magnétique des périmètres nord et sud de Baie-St-Paul.

4.1.1.1 Levé magnétométrique du périmètre sud

La carte de la figure 21 présente les données krigées du champ magnétique total mesuré dans le périmètre sud de Baie-St-Paul. Dans l'ensemble, la carte montre une forte hétérogénéité dans la distribution des valeurs du champ magnétique total. Toutefois, ces valeurs sont bien structurées dans l'espace et semblent identifier des unités ou structures spécifiques. Dans un premier temps, les plus faibles valeurs du champ total sont observées aux extrémités ouest et est de la baie. Ceci suggère a priori une certaine similitude entre les unités géologiques responsables de cette signature magnétique. Après vérification sur le terrain, nous avons observé des affleurements de roches calcaires dans ces secteurs (chemin de la Pointe, Rte 362 et chemin du vieux quai). Ces unités de roches ordoviciennes sont caractérisées par de faibles valeurs de susceptibilité magnétique par rapport aux valeurs normalement élevées attendues pour des roches du socle précambrien (gneiss et granitoïdes).

Une structure orientée nord-sud (A-I) et positionnée du côté centre-ouest de la baie contraste fortement avec les valeurs de champ total observées ailleurs sur les hautes battures et sur l'estran (batture inférieure) de Baie-St-Paul. Cette structure est marquée par une augmentation du champ magnétique total et atteint un maximum d'intensité dans un secteur marqué par la présence d'un chenal d'érosion périodiquement envahie par l'eau de mer à marée haute. Cette structure de drainage de la haute batture est axiale par rapport à l'anomalie magnétique observée. Toutefois, après vérification sur le terrain, il apparaît évident que l'érosion localisée des sédiments (et sols) de la haute batture dans ce secteur ne peut expliquer l'amplitude de l'anomalie magnétique observée sur la carte de la figure 21. A cet endroit, le chenal fait de 4 à 8m de largeur ce qui est infime par rapport à la dimension de l'anomalie magnétique observée. De plus, notez que dans ce secteur la haute batture est essentiellement constituée de dépôts sédimentaires argileux marins (anciens). De plus, les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées près de cette structure sont systématiquement faibles ce qui ne peut expliquer l'origine de l'anomalie magnétique observée dans ce secteur. Une source profonde expliquerait cette anomalie.

Une autre structure intéressante (A-II) est située immédiatement au sud du quai de Baie-St-Paul (fin de la rue Ste-Anne). Cette zone, de forme circulaire, est marquée par de plus faibles valeurs du champ magnétique total. La zone est relativement homogène et occupe une surface importante du

côté sud et sud-est du quai de Baie-St-Paul. Cette anomalie pourrait correspondre à une structure d'accumulation sédimentaire récente suite à la construction du quai qui perturbe le régime d'écoulement de la rivière du Gouffre et modifie la trajectoire d'arrivée des vagues du St-Laurent lors de marées hautes. Des sédiments fins à plus faible susceptibilité magnétique seraient possiblement concentrés à cet endroit (Fig. 21).

Les terres agricoles présentement exploitées dans le périmètre sud et plus spécifiquement au nord-ouest du chemin de fer montrent une structure régulière d'augmentation du champ magnétique total en s'éloignant de la rue Fafard et en se rapprochant des hautes battures (**A-III**). Près de la rue Fafard, le champ magnétique total est relativement faible ce qui suggère la présence d'une faible épaisseur de dépôts non consolidés dans ce secteur ou la présence d'une seconde unité sédimentaire caractérisée par une faible susceptibilité magnétique. L'examen de la figure 5 (carte pédologique) montre la présence d'une unité de dépôts fluvio-glaciaires présente au nord-ouest de la rue Fafard. Cette unité serait possiblement présente sous une couche devenant de plus en plus atténuée de sédiments marins argileux. Alternativement, il serait aussi probable que des roches calcaires soient présentes à faible profondeur à cet endroit. En l'absence de forages, il est difficile de supporter une ou l'autre des hypothèses.

Il est important de souligner que le secteur de la ferme Tremblay ainsi que les hautes battures adjacentes (situées du côté nord-est de la rivière du Gouffre) (**A-IV**) montrent des valeurs de champ magnétique total semblables à celles observées dans le secteur de l'anomalie **A-I** située du côté sud-ouest de la rivière du Gouffre (**Fig. 21**). Pour vérifier l'origine de l'anomalie **A-IV**, nous avons mesuré la susceptibilité magnétique des sédiments littoraux marins (anciens) de la haute batture et ces valeurs sont nettement plus élevées ($10,8 \cdot 10^{-3}$ SI) que celles mesurées sur les sédiments de la haute batture dans le secteur de l'anomalie **A-I** ($3,1 \cdot 10^{-3}$ SI) (**Fig. 23**). Cette observation suggère que la nature plus magnétique des sédiments du secteur de l'anomalie **A-IV** pourrait expliquer en partie ou en totalité l'anomalie magnétique observée. À l'opposé, le secteur de l'anomalie **A-I** (montrant des valeurs de susceptibilité magnétique faibles des sédiments de surface) semble affecté par la présence d'une structure plus magnétique située en profondeur sous la couverture de dépôts marins. Cette structure pourrait être reliée entre autre à une remontée du socle précambrien. Alternativement, dans un concept sédimentaire, cette anomalie pourrait être interprétée comme un vestige d'un ancien placier enfouis sous des sédiments marins plus récents.

Baie St-Paul (périmètre sud)

Carte du champ magnétique total

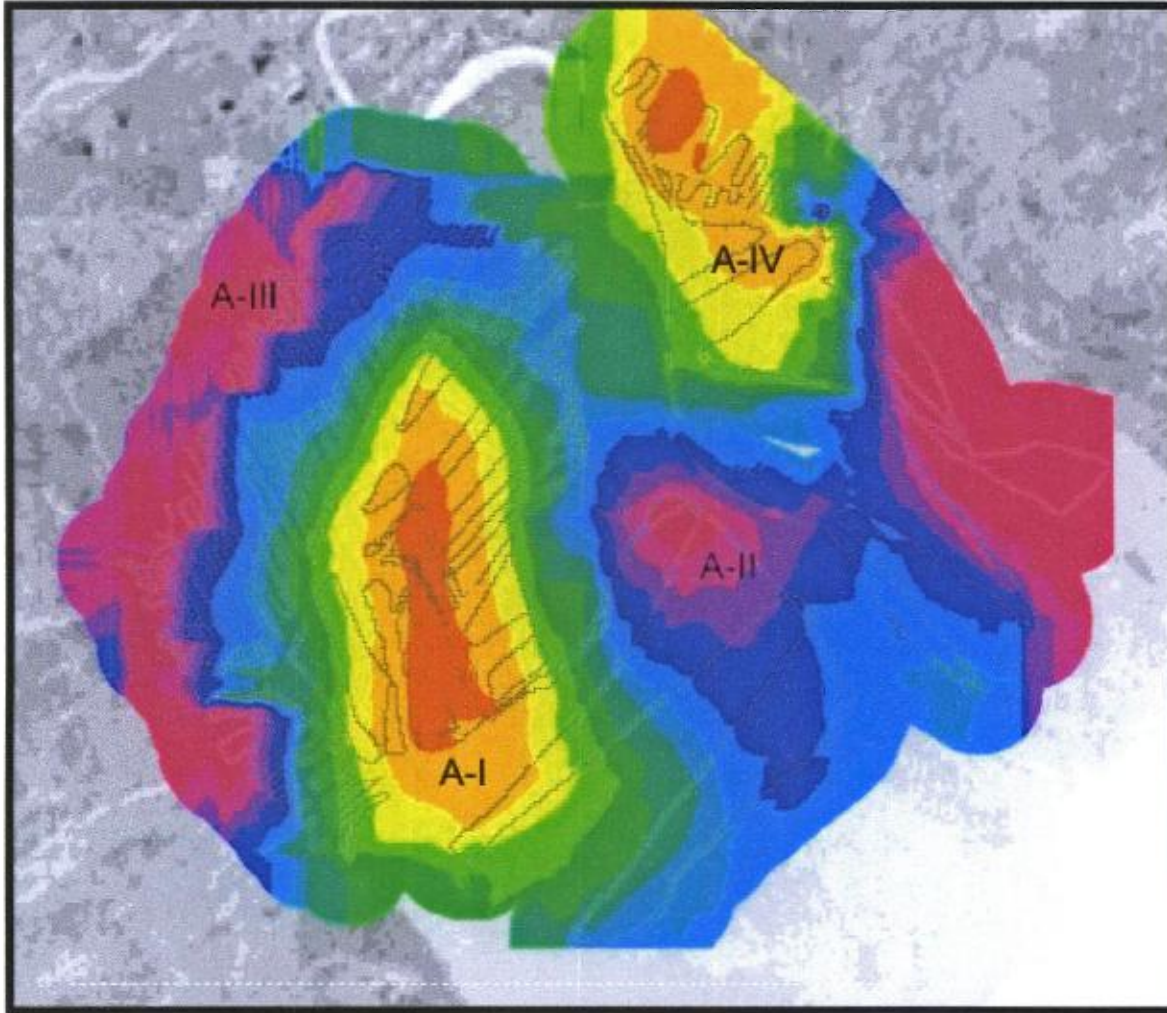


Figure 21. Carte des données krigées du champ magnétique total mesuré dans le périmètre sud de Baie-St-Paul. Les secteurs anomalies A-1 à A-IV sont discutés dans le texte.

La carte de la figure 22 montre la distribution des anomalies du champ magnétique total observées le long des différentes lignes d'acquisition dans le périmètre sud de Baie-St-Paul. Sur cette carte, les anomalies positives sont marquées par des valeurs supérieures à 0 et les anomalies négatives par des valeurs inférieures à 0. Nous avons identifié cinq zones anomalies sur la carte. Le choix de ces dernières est principalement dicté par l'intensité de l'anomalie et l'absence de continuité latérale importante de l'anomalie. Dans un objectif d'exploration gazière, ce type de structure pourrait correspondre à des halos d'altération associés à la présence de fuite d'hydrocarbures en sub-surface. Notez qu'une anomalie linéaire trop importante correspond souvent à un contact géologique entre deux unités contrastées pour ce qui est des valeurs de susceptibilité magnétique.

Après vérification sur le terrain, l'anomalie **A.m.1** située du côté est de la rivière du Gouffre correspond à une zone d'accumulation de magnétite (sables noirs) sur un cordon sableux situé dans une zone de transition entre haute et basse battures.

L'anomalie **A.m.2** située près de la côte est n'est pas expliquée à partir des observations de surface. Cette zone plus magnétique pourrait avoir un intérêt pour l'exploration d'hydrocarbures. L'anomalie **A.m.3** située la plus au sud de l'estran n'est pas expliquée par les observations de surface. Ce secteur pourrait également être une cible intéressante pour l'exploration d'hydrocarbures. L'anomalie **A.m.4** située sur l'estran sud-ouest ne s'explique pas par la nature des sédiments observés dans ce secteur (argiles silteuses). Toutefois, sous la couche de sédiments il pourrait y avoir une couche de sédiments grossiers à plus forte susceptibilité magnétique qui pourrait expliquer l'anomalie. D'un autre côté, le secteur pourrait aussi être influencé par la présence d'un halo d'altération situé au dessus de fuites d'hydrocarbures. L'anomalie **A.m.5** située sur la haute batture du côté sud-ouest de la rivière du Gouffre est centrée sur l'anomalie magnétique **A-I** (Fig. 21) et pourrait être intéressante pour l'exploration d'hydrocarbures.

Périmètre Sud Baie-St-Paul

Anomalies magnétiques

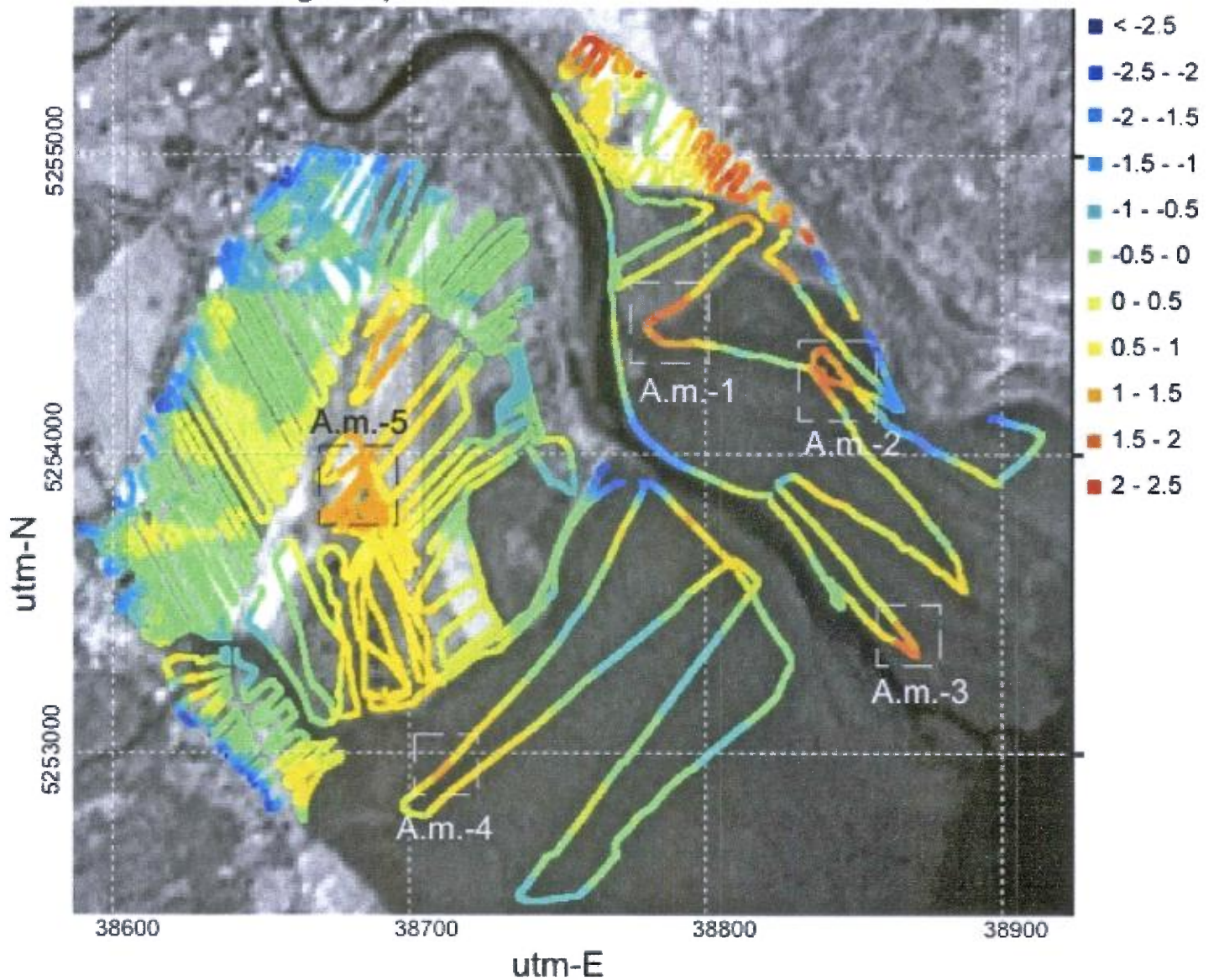


Figure 22. Carte des anomalies du champ magnétique total dans le périmètre sud de Baie-St-Paul. Les secteurs anomaux A.m.-1 à 5 sont discutés dans le texte.

4.1.2.1 *Données de susceptibilité magnétique*

Les figures 23 à 25 présentent une vue d'ensemble de la variabilité des valeurs de susceptibilité magnétique mesurées sur 170 points d'échantillonnage situés dans le périmètre sud de Baie-St-Paul. Compte tenu de l'étendue régionale des principales unités lithologiques et quaternaires, ces données sont également utiles pour la compréhension de la carte des levés magnétométriques du périmètre nord.

Ces données sont utiles pour apprécier les contrastes de susceptibilité magnétiques observés entre les matériaux de surface et les affleurements rocheux qui bordent les extrémités est et ouest de la baie. Des calcaires et gneiss, des sédiments argilo-silteux de l'estran, du sable de la plage de Baie-St-Paul, des sols argileux provenant des hautes battures ainsi que des alluvions grossières présentes en bordure de la rivière du Gouffre ont été analysés.

Les sédiments silto-argileux et argilo-silteux de l'estran (batture inférieure), les sols argileux et les sédiments marins des hautes battures montrent des valeurs de susceptibilité magnétique relativement modérées (Fig. 23). Les sédiments silto-argileux de l'estran montrent une susceptibilité magnétique moyenne de $6,9 \pm 4,9 * 10^{-3}$ SI et en s'éloignant vers le large des valeurs de l'ordre de $4,3 \pm 1,3 * 10^{-3}$ SI. Les sédiments argileux marins anciens présents sur les hautes battures ouest montrent également de faibles valeurs de susceptibilité magnétique ($3,12 \pm 1,98 * 10^{-3}$ SI). Les sédiments de la plage, qui débute au quai de Baie St-Paul et longe le boisé, montrent des valeurs de susceptibilité magnétique très contrastées en raison de la présence d'oxydes de Fe (et probablement de Fe et Ti) en proportions variables dans le sable. La partie basse de la plage, caractérisée par une faible abondance en oxydes de fer, est caractérisée par une susceptibilité magnétique de $6,39 \pm 4,01 * 10^{-3}$ SI tandis que la partie haute de la plage, riche en oxydes de fer, montre une susceptibilité magnétique moyenne de $198 \pm 111 * 10^{-3}$ SI (Fig. 24; 26). Ces valeurs peuvent être considérées comme hautement anomaliques pour la région.

Les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées sur les alluvions récentes de la rivière du Gouffre (rive est) et sur les sédiments de la haute batture située du côté est sont systématiquement plus élevées que pour les équivalents respectifs situés à l'ouest de la rivière du Gouffre. Par exemple, les sédiments et sols des hautes battures du côté ouest montrent une susceptibilité magnétique moyenne de $3,1 * 10^{-3}$ SI par rapport aux sédiments et sols des hautes battures du côté est qui montrent une

valeur moyenne de $10,8 \cdot 10^{-3}$ SI. La différence observée pourrait s'expliquer par une différence dans la granulométrie des sédiments marins et littoraux présents sur les deux battures. Les mesures de la haute batture du côté ouest provenaient de matériaux plus limoneux tandis que ceux du côté est de matériaux plus silto-sableux.

Les observations de surface et les mesures de susceptibilité magnétique montrent que des dépôts sableux et sablo-gravelleux riches en oxydes de fer sont aussi présents du côté est de la rivière du Gouffre. La figure 24 montre l'étalement des valeurs mesurées sur un cordon sableux situé dans la zone de transition entre haute et basse battures dans ce secteur.

Dans le secteur de Baie-St-Paul, les valeurs de susceptibilité magnétique des roches gneissiques et calcaires sont très contrastées. En moyenne, les calcaires ont une faible susceptibilité magnétique ($0,33 \pm 0,36$) par rapport aux gneiss ($7,32 \pm 7,39$) (Fig. 25). Ce contraste peut être utile pour localiser à partir de la carte du levé magnétométrique un contact entre gneiss et roches calcaires dans ce secteur.

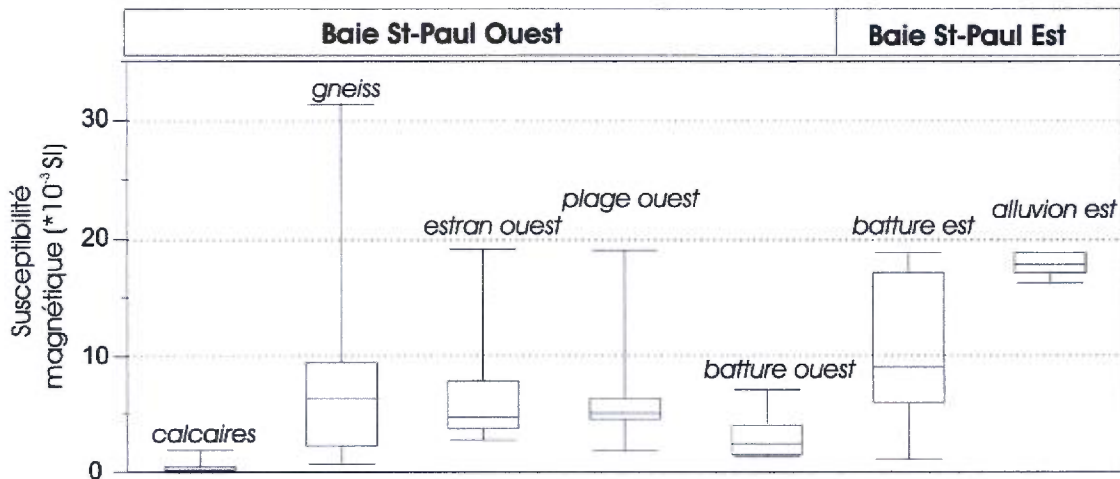


Figure 23. Variabilité des valeurs de susceptibilité magnétique observées dans les roches et sédiments non-consolidés de la partie sud de Baie-St-Paul.

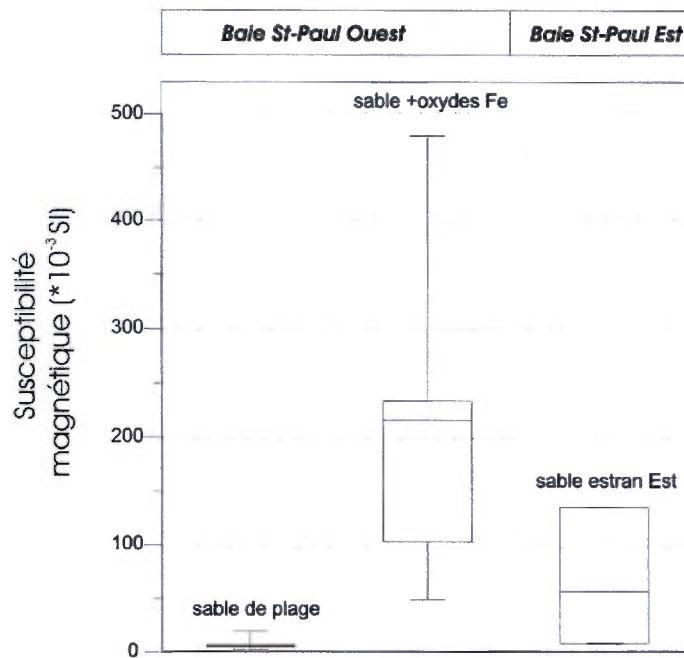


Figure 24. Variabilité des valeurs de susceptibilité magnétique observées dans les sédiments sableux de Baie-St-Paul. Les hautes valeurs observées dans les sédiments sableux des cotés est et ouest de Baie-St-Paul sont associés à la présence d'oxydes de fer magnétiques (probablement de la magnétite avec un peu d'ilménite).

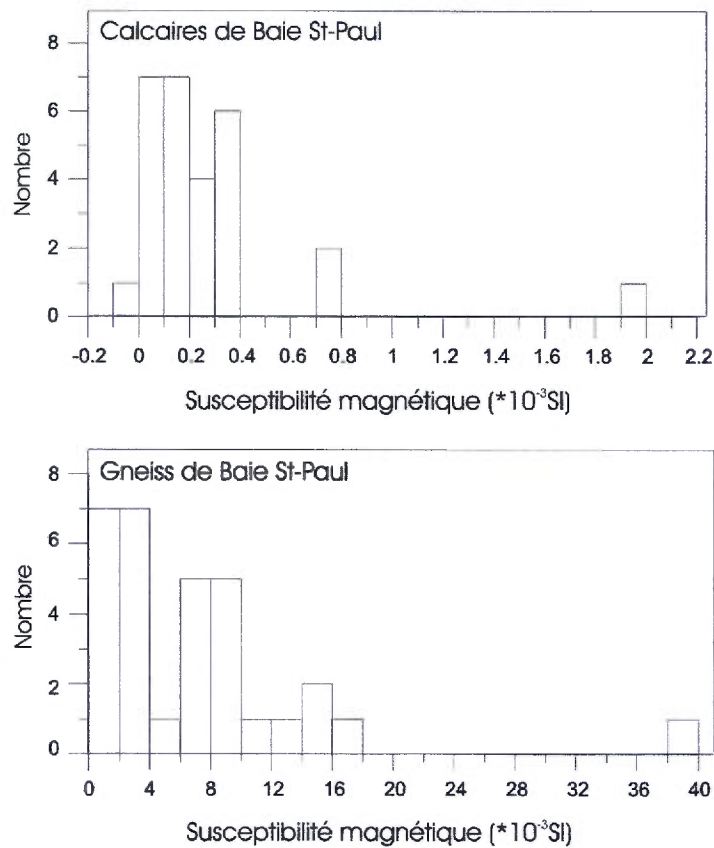


Figure 25. Comparaison des valeurs de susceptibilité magnétique mesurées sur les affleurements calcaires et gneissiques du secteur Sud de Baie St-Paul.

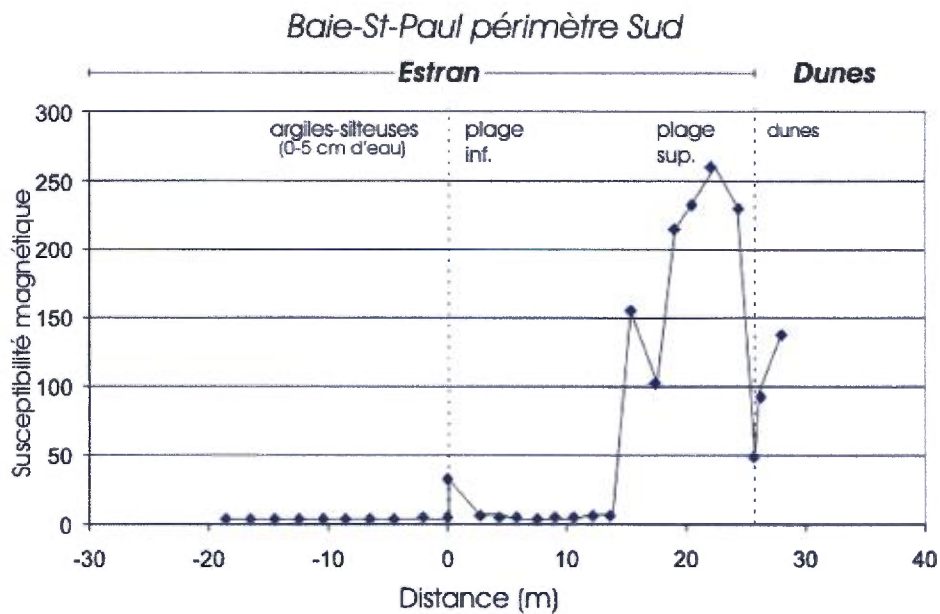


Figure 26. Variation de la susceptibilité magnétique des sédiments en fonction de la distance (en mètre) d'une section perpendiculaire à la plage de Baie-St-Paul (secteur du quai de Baie St-Paul). Notez les très hautes valeurs de susceptibilité magnétique dans la partie supérieure de la plage et dans les dunes.

4.1.2. Levés de conductivité électrique

4.1.2.1. Levés de conductivité électrique dans le périmètre sud

Dans cette section nous présentons les résultats du levé de conductivité électrique obtenus pour différentes fréquences d'induction électromagnétique. La basse fréquence (de 630 Hz) est la plus pénétrative tandis que la plus haute fréquence (de 4530 Hz) est moins pénétrative et donc beaucoup plus sensible aux perturbations de la sub-surface.

La figure 27 présente les variations de conductivité électriques (aux différentes fréquences d'induction) en fonction de la position utm-E des stations de mesure. Dans l'ensemble, la figure montre un accroissement généralisé de la conductivité électrique vers la partie centrale de la vallée. Ceci est compatible avec l'observation d'épais dépôts riches en argiles prédominantes dans la partie centrale de la vallée et avec la présence de dépôts à dominance glaciaire (tills et sédiments fluvio-glaciaires) aux extrémités ouest et est de la vallée de la rivière du Gouffre.

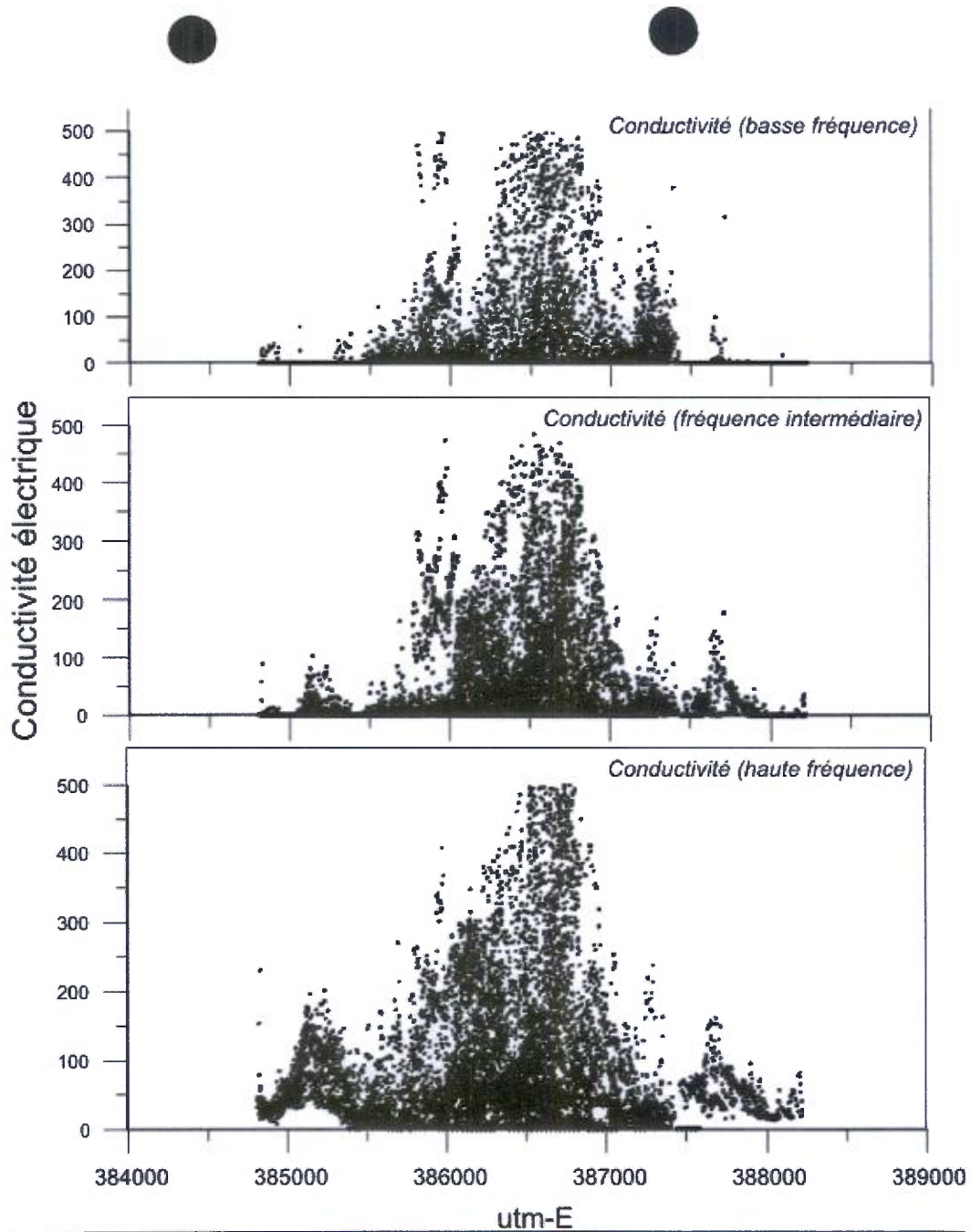


Figure 27. Variation des valeurs de conductivité électrique (en mS/m) mesurées pour les basse, moyenne et haute fréquences d'induction électromagnétique en fonction de la position utm-E des stations de mesure. Notez que sur cette figure l'est géographique est vers la droite.

La figure 28 montre la distribution des valeurs de conductivité électrique observées pour les différentes fréquences d'induction électromagnétique. Cette figure montre clairement une tendance d'augmentation de la conductivité électrique en fonction de l'augmentation de la fréquence d'induction utilisée. Ceci démontre que dans l'ensemble, les matériaux présents en plus grande profondeur tendent à être électriquement moins conducteurs.

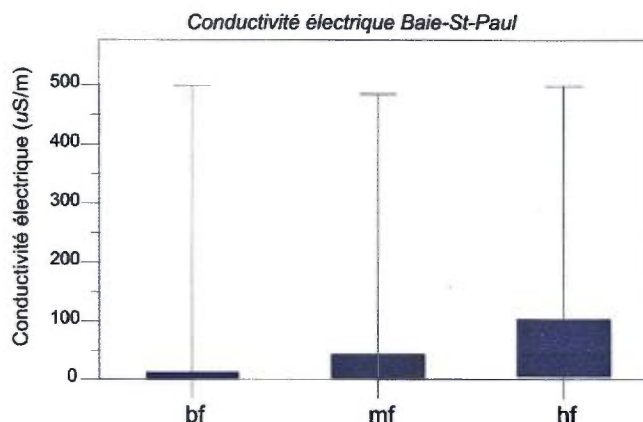


Figure 28. Variations de la conductivité électrique mesurées pour la basse fréquence (bf), la fréquence intermédiaire (mf) et la haute fréquence (hf) d'induction électromagnétique. Notez l'augmentation progressive de la conductivité en fonction de la fréquence d'induction.

4.1.2.1.1 Haute fréquence (4530 Hz)

Cette fréquence d'induction relativement peu pénétrative nous renseigne sur les variations de conductivité électrique observées entre la surface et approximativement 5m de profondeur. Cette épaisseur de matériaux de surface correspond dans ce secteur au sol naturel (ou agricole) et a son substrat dominé par des sédiments marins quaternaires et des alluvions récentes.

Les figures 29 et 30 montrent une distribution relativement simple de la conductivité électrique dans la partie centrale (C-1) de la carte mais des valeurs beaucoup plus contrastées dans les parties sud-ouest et ouest (C-2) de la carte. Le long du chemin de la Pointe, qui longe le côté sud-ouest de la baie, la conductivité électrique chute rapidement en se rapprochant de la colline. Ceci suggère l'amincissement relativement rapide de la couche de dépôts meubles et la proximité du roc dans ce secteur. Dans la partie relativement homogène (en mauve sur la carte; C-1), la carte montre des structures ressemblant à des chenaux d'érosion (C-3). Ces chenaux sont orientés SO-NE et ce perpendiculairement au réseau actuel de drainage de cette partie de la vallée du Gouffre. Les structures, interprétées comme des vestiges de chenaux, ne sont pas visibles à la surface des terres

agricoles actuellement en production. Toutefois, ces structures discordantes semblent avoir jouées un rôle important avant l'aménagement du territoire et probablement avant la transgression marine responsable de la déposition des sédiments argileux marins dans ce secteur.

Un secteur à forte conductivité électrique (C-4) est présent au sud-ouest de la carte et plus précisément à la sortie d'une rivière secondaire. En fonction des marées, cette zone est régulièrement affectée par l'invasion d'eau de mer (électriquement très conductrice). Nous interprétons cette zone de haute conductivité électrique par la présence d'eau de mer rémanente dans les sédiments relativement mal drainés de ce secteur et par l'abondance de sédiments marins argileux fins. Notez que la partie sud de cette zone anomalique a historiquement été le lieu du chantier naval de la famille Simard. Aujourd'hui, il ne reste plus de traces à la surface de ce chantier.

Finalement, sur les terres de la ferme Tremblay (du côté nord-est de la rivière du Gouffre) l'on observe une chute rapide de la conductivité électrique en s'éloignant vers le nord-est de la rivière du Gouffre (C-5). Cette diminution de conductivité électrique pourrait s'expliquer par l'amincissement des dépôts meubles dans ce secteur et la présence de roches calcaires en sub-surface. Notez que les calcaires sont des roches à très faibles conductivités électriques. Également, cette chute de conductivité électrique pourrait s'expliquer par la présence de dépôts quaternaires électriquement moins conducteurs situés au pied de la colline présente dans ce secteur. Les données conductivité électrique à basse fréquence devraient apporter des précisions supplémentaires sur l'origine probable de cette zone.

Baie-St-Paul (périmètre sud)
Conductivité électrique (haute fréquence)

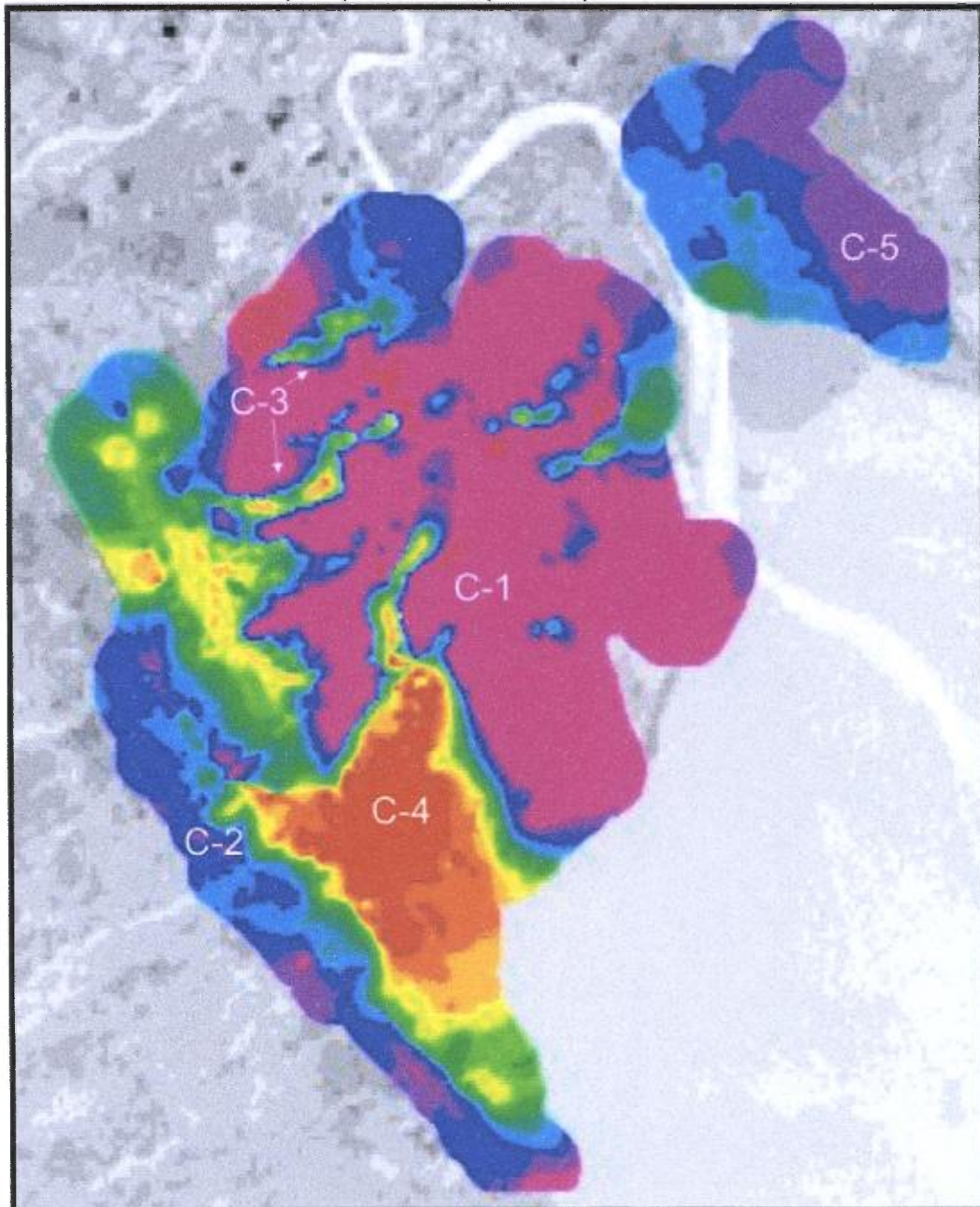


Figure 29. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 4530 Hz. Notez la présence de paléo-chenaux sous les terres agricoles actuelles.

Périmètre Sud Baie-St-Paul Conductivité électrique (GEM2-haute fréquence)

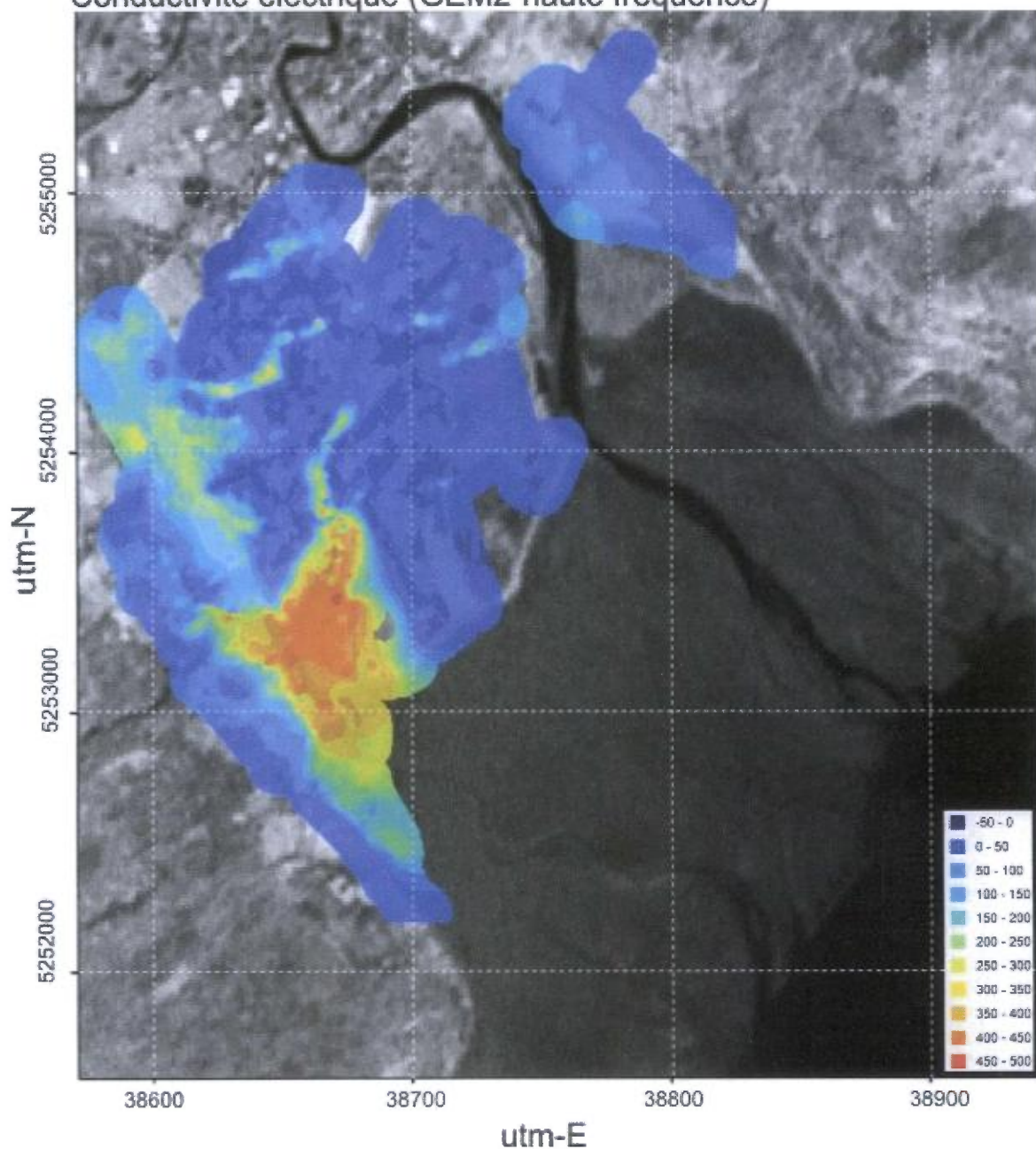


Figure 30. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 4530 Hz. Un facteur de transparence a été appliqué aux données krigées présentées sur cette figure pour faciliter la localisation spatiale des zones anomaliques. Les données de conductivité électrique sont en mS/m.

4.1.2.1.2 Fréquence intermédiaire (1830 Hz)

Cette fréquence intermédiaire plus pénétrative nous renseigne sur les variations de conductivité électrique observée entre la surface et approximativement 10 m de profondeur. Cette épaisseur de matériaux correspond dans ce secteur au sol naturel ou agricole et aux substrats dominés par des sédiments marins quaternaires, des alluvions et localement par le roc en place.

La carte de conductivité électrique mesurée à la fréquence d'induction de 1830 Hz (Fig. 31) montre sensiblement les mêmes structures que la carte de conductivité électrique mesurée à haute fréquence (Fig. 29 et 30). Toutefois, l'on note que les structures discordantes (C-3), qui sont probablement d'anciens chenaux d'érosion, sont moins prononcées. Ceci est compatible avec la nature même des chenaux d'érosion qui sont des structures généralement peu pénétratives dans ce type de terrain.

Un secteur situé au nord du parc nautique et du boisé municipale (C-6) montre une plus forte hétérogénéité en fréquence intermédiaire qu'en haute fréquence d'induction. Il semble y avoir des matériaux plus conducteurs situés en profondeur dans ce secteur. La signature de conductivité électrique de ces matériaux ressemble à celle observée sur la haute bature de l'autre côté de la rivière du Gouffre (côté est).

La zone anormale C-5 observée sur la figure 29 est toujours présente sur la figure 31. Cette dernière s'élargit pour une fréquence d'induction intermédiaire. Elle pourrait être constituée de matériaux sablo-graveleux fluvio-glaciaires et localement de roches calcaires.

Baie-St-Paul (périmètre sud)

Conductivité électrique (fréquence intermédiaire)

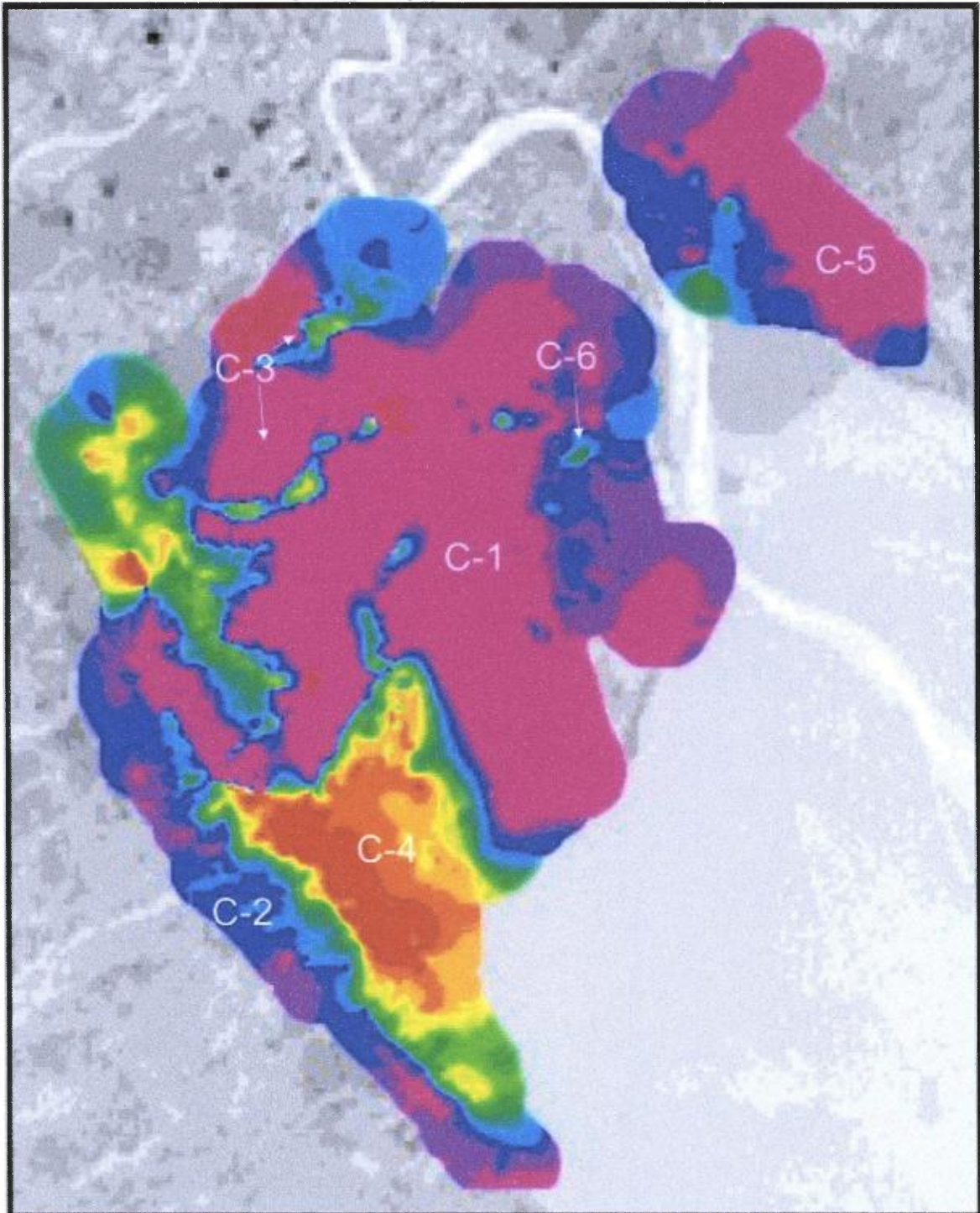


Figure 31. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 1830 Hz. Notez la présence de paléo-chenaux sous les terres agricoles actuelles.

Périmètre Sud Baie-St-Paul

Conductivité électrique (GEM2-fréquence intermédiaire)

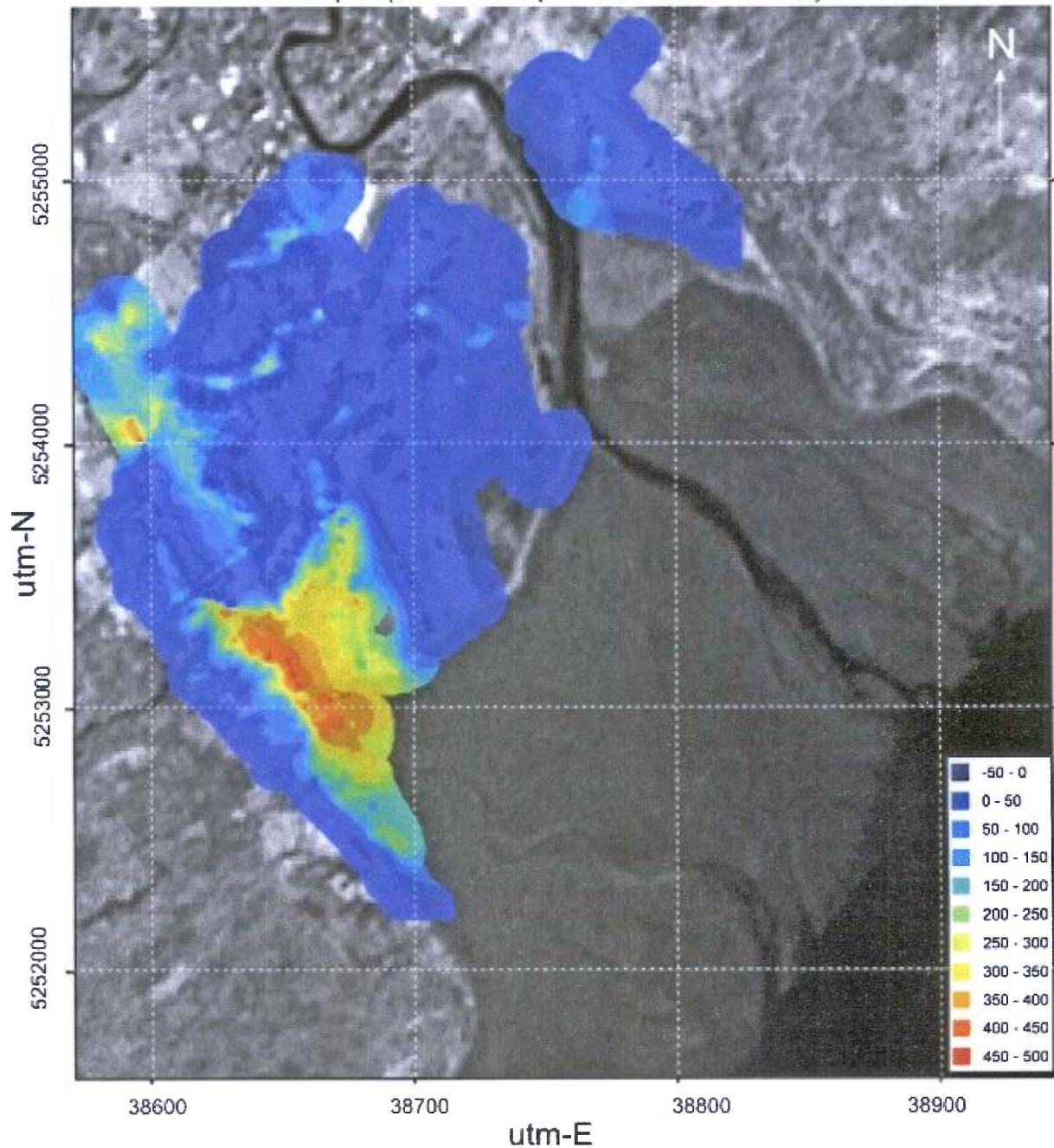


Figure 32. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 1830 Hz. Un facteur de transparence a été appliqué aux données krigées présentées sur cette figure pour faciliter la localisation spatiale des zones anomaliques. Les données de conductivité électrique sont en mS/m.

4.1.2.3 Basse fréquence (630 Hz)

Cette basse fréquence d'induction est la plus pénétrative des fréquences utilisées lors du levé de conductivité électrique. Elle permet de quantifier les variations de conductivité électrique observée entre la surface et approximativement 15 à 20 m de profondeur. Cette épaisseur de matériaux correspond dans ce secteur au sol naturel ou agricole et aux substrats dominés par des sédiments marins quaternaires, des alluvions récentes et anciennes et ou localement par le roc en place.

Les cartes de basse fréquence (Fig. 33 et 34) ne montrent pas les structures discordantes (paléochenaux) observées sur les terres agricoles et sur la haute bature (C-3) (Fig. 29 et 31). A cette fréquence d'induction, les matériaux présents en profondeur ont une plus forte réponse que les matériaux présents à la surface. Ceci explique pourquoi les cartes de conductivité électrique sont sensiblement différentes pour les haute et basse fréquences d'induction électromagnétique.

La figure 33 souligne que la partie centrale du périmètre sud tend à former un plateau homogène (C-1) pour la fréquence d'induction à 630 Hz. Cette observation suggère que les processus d'érosion de surface n'ont pas affectés la partie profonde de ces sédiments marins et littoraux présents dans ce secteur. Le secteur au nord du parc nautique près de la rivière du Gouffre montre encore la présence de matériaux plus conducteurs (C-6). Contrairement à la fréquence d'induction intermédiaire (Fig. 31), l'unité de matériaux plus conducteurs semble plus continue à basse fréquence et semble se prolonger dans une unité qui entoure le plateau central (C-1). Cette unité pourrait être constituée d'anciennes alluvions de la rivière du Gouffre lorsque le débit (et le niveau d'eau) de cette rivière était plus élevé.

A l'intérieur de la zone homogène centrale (C-1), l'on observe un alignement de petites anomalies circulaires qui pourraient avoir plusieurs origines (C-7). Étant non accessible à partie de la surface, il est difficile d'en expliquer l'origine. D'une façon spéculative, elles pourraient correspondre à des perturbations locales reliées à la percolation d'hydrocarbures vers la surface. Si les sédiments marins à cette profondeur d'investigation sont anciens, ils pourraient avoir été mis en place sous une colonne d'eau de mer de plus de 150 à 200 m. Dans ces conditions, des cratères de dégazage de type *pockmarks* pourraient s'être formés. Ce type de structure de dégazage est actuellement observé dans plusieurs endroits dans les sédiments profonds du St-Laurent.

Baie-St-Paul (périmètre sud)
Conductivité électrique (basse fréquence)

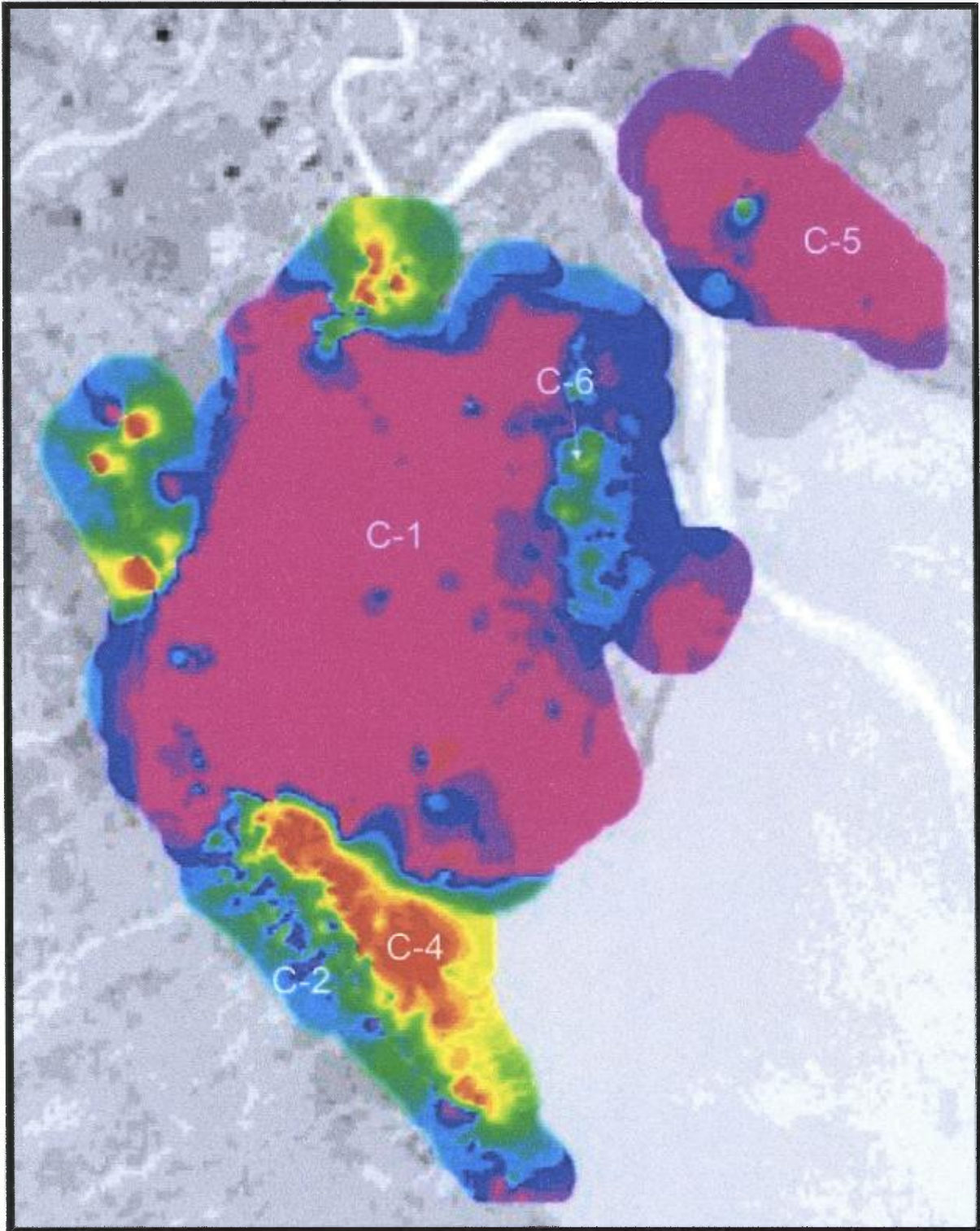


Figure 33. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 630 Hz. Notez la présence de paléo-chenaux sous les terres agricoles actuelles.

Périmètre Sud Baie-St-Paul

Conductivité électrique (GEM2-basse fréquence)

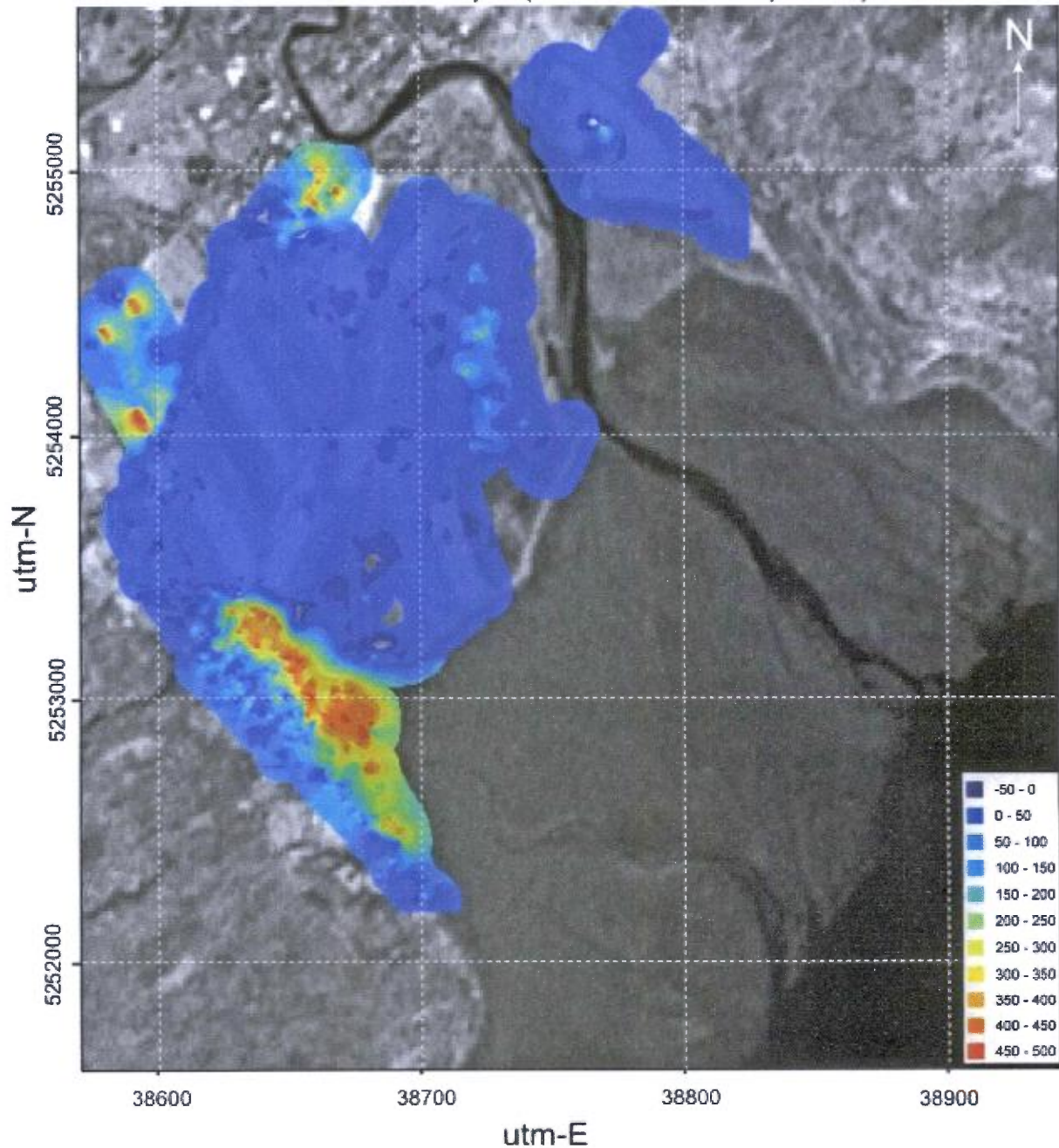


Figure 34. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 630 Hz. Un facteur de transparence a été appliqué aux données krigées présentées sur cette figure pour faciliter la localisation spatiale des zones anomaliques. Les données de conductivité électrique sont en mS/m.

4.2. LEVÉS DANS LE PÉRIMÈTRE NORD

4.2.1 Levé magnétométrique dans le périmètre nord

Les données du levé magnétométrique réalisé dans le périmètre nord sont présentées à la figure 35 après avoir été corrigées et interpolées par krigeage géostatistique. La carte est caractérisée par deux éléments distinctifs. Premièrement, une forte anomalie est présente dans la partie nord-ouest du périmètre avec un contact est-ouest et devenant nord-sud en se rapprochant de la rivière du Gouffre (**Mag-1**). Le second élément significatif est la présence d'une discontinuité nord-sud passant du côté est de la rivière du Gouffre (**Mag-2**). Cette discontinuité sépare deux domaines de valeurs de champ magnétique distincts. Le terrain situé vers l'est est caractérisé par une succession de bandes d'orientation N-S montrant une gradation du champ magnétique total. Cette signature reflète probablement une alternance d'unités marines et glaciaires quaternaires dans ce secteur.

Dans les coteaux agricoles situés au Nord-Est (**Mag-3**), la chute rapide du champ magnétique total peut s'expliquer par la très faible épaisseur de dépôts de surface et la présence d'un grand nombre d'affleurements de calcaires indiquant la présence du socle rocheux en sub-surface dans ce secteur.

Au Sud-Est, la variabilité observée du champ magnétique total ressemble à celle observée de la conductivité électrique suggérant que ces contrastes sont principalement reliés à des variations de susceptibilité magnétique des matériaux présents à la surface. Dans ce secteur, la partie la plus élevée en altitude montre la présence de matériaux fluvio-glaciaires et de tills (**Mag-4**) tandis que la partie plus basse sur les terres agricoles devient rapidement plus argileuse en se dirigeant vers la rivière du Gouffre. Ces dépôts argileux sont reliés à l'accumulation de sédiments marins.

La zone à plus forte intensité magnétique observée au nord-ouest de la carte (**Mag-1**) n'est pas explicable à partir des observations de surface. Ce secteur agricole est relativement horizontal avec quelques dépressions mal drainées. Les cartes de conductivité électrique n'identifient pas d'unités quaternaires ou pédologiques propres à ce secteur. Une hypothèse serait que le socle rocheux dans ce secteur soit localement constitué de gneiss grenvillien. Ces gneiss, qui possèdent de plus fortes susceptibilités magnétiques que les calcaires sont observés de part et d'autre de la vallée de la rivière du Gouffre et forment les assises du graben du Gouffre.

Le secteur sud-ouest de la carte (Mag-5) montre des valeurs de champ magnétique total inférieures qui semblent corrélées avec la présence sur le terrain de matériaux argileux. Ce secteur est de plus influencé par un bon dénivelé topographique avec une pente vers le sud. La partie sud de ce secteur anomalique a probablement été impliquée dans un ancien glissement de terrain.

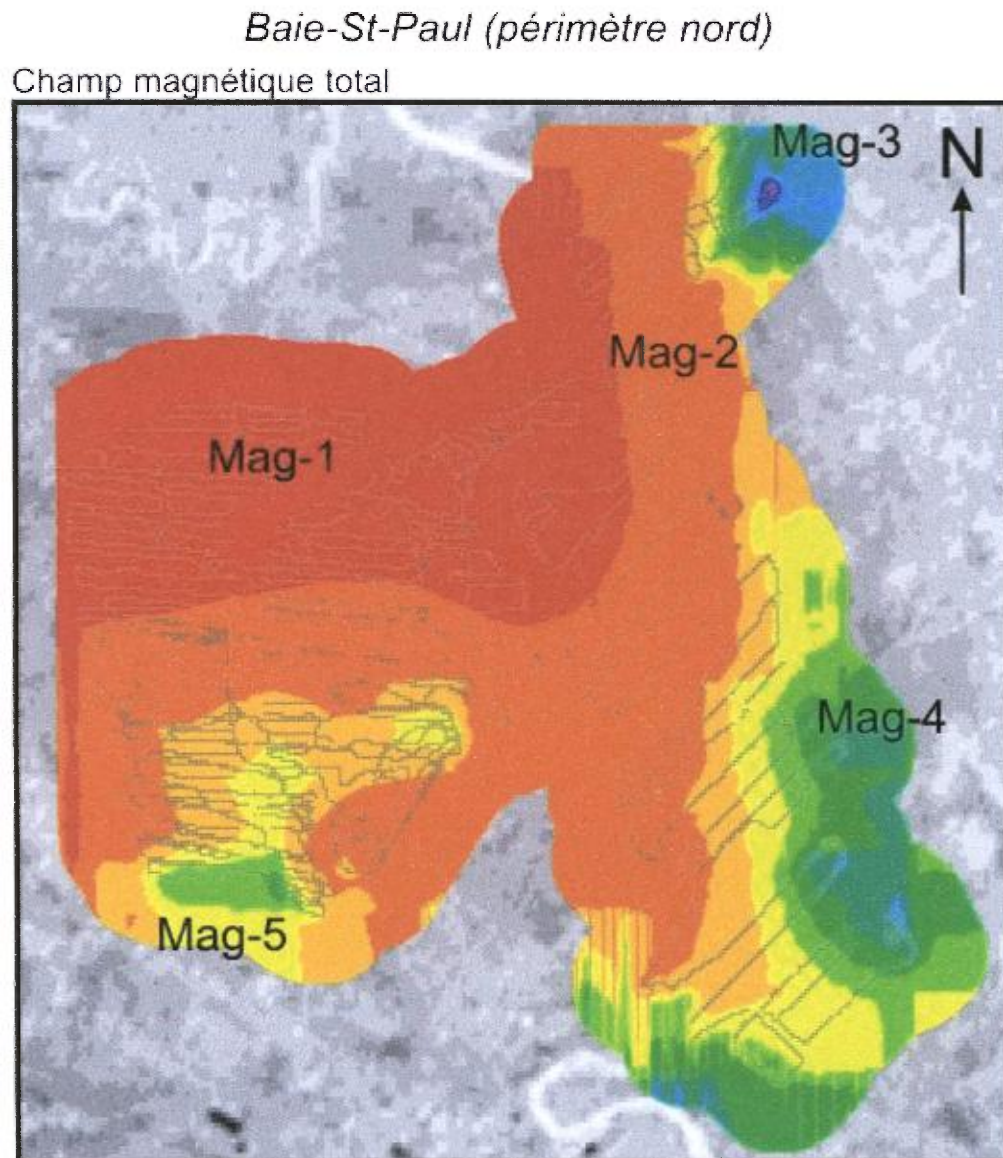


Figure 35. Carte des données krigées du champ magnétique total mesuré dans le périmètre nord de Baie-St-Paul.

4.2.2. Levé de conductivité électrique dans le périmètre nord

Dans cette section nous présentons les résultats du levé de conductivité électrique réalisé dans le périmètre nord de Baie-St-Paul. Les données de conductivité électrique pour les fréquences de 4530, 1830 et 630 Hz sont présentées aux figures 36, 37 et 38.

4.2.2.1 *Haute fréquence (4530 Hz)*

Cette fréquence d'induction peu pénétrative nous renseigne sur les variations de conductivité électrique observées entre la surface et approximativement 5 m de profondeur. Dans ce secteur, cette épaisseur de matériaux correspond au sol naturel (ou agricole) et a son substrat dominé par des tills, des sédiments fluvio-glaciaires ou des sédiments argileux marins.

La figure 36 présente une distribution relativement complexe de la conductivité électrique sur l'ensemble du périmètre nord. La partie ouest de ce périmètre (bordant le boulevard Mgr de Laval) montre une zone relativement conductrice (**Ce-1**) qui passe progressivement vers le centre de la carte à une zone plus résistive (**Ce-2**). Après vérification sur le terrain, ceci traduit le passage d'une unité à dominance argileuse à l'ouest à une unité plus sableuse vers le centre du périmètre. Ceci se reflète également par la présence de sols agricoles mal drainés vers l'ouest.

Initialement, à la suite de la dernière grande transgression marine, l'unité argileuse marine devait recouvrir l'ensemble des terrains situés à l'ouest et à l'est de la rivière du Gouffre et à une altitude inférieure à 175m. L'érosion, facilitée par un relief localement accidenté, a localement facilitée l'érosion de cette couche. L'impact de ces différents processus géomorphologiques est reflété par l'hétérogénéité observée sur la carte de la figure 36.

Un domaine anomalique (**Ce-3**) est localisé dans la partie centre-est de la carte. Ce domaine s'étend de la rivière du Gouffre jusqu'au chemin St-Laurent situé du côté est de la vallée. Ce secteur est marqué par de plus fortes conductivités électriques. Selon la carte pédologique (Fig. 6) et nos observations de terrain, le substrat des sols agricoles dans ce secteur est principalement constitué de matériaux argileux marins. Ces derniers sont naturellement plus conducteurs car les argiles peuvent retenir une proportion plus importante d'eau ce qui facilite la conduction de l'électricité dans le sol.

De l'autre côté du chemin St-Laurent, le terrain devient moins conducteur (**Ce-4**) ce qui est compatible avec la présence d'unités fluvio-glaciaires et de tills (plus en altitude) dans ce secteur (Fig. 6). Ces matériaux sablo-graveleux sont électriquement moins conducteurs que les argiles présentes de l'autre côté du chemin St-Laurent. L'extrémité nord-est de la carte montre également la présence de matériaux glaciaires plus résistifs (**Ce-5**).

Baie-St-Paul (périmètre nord)
Conductivité électrique (haute fréquence)

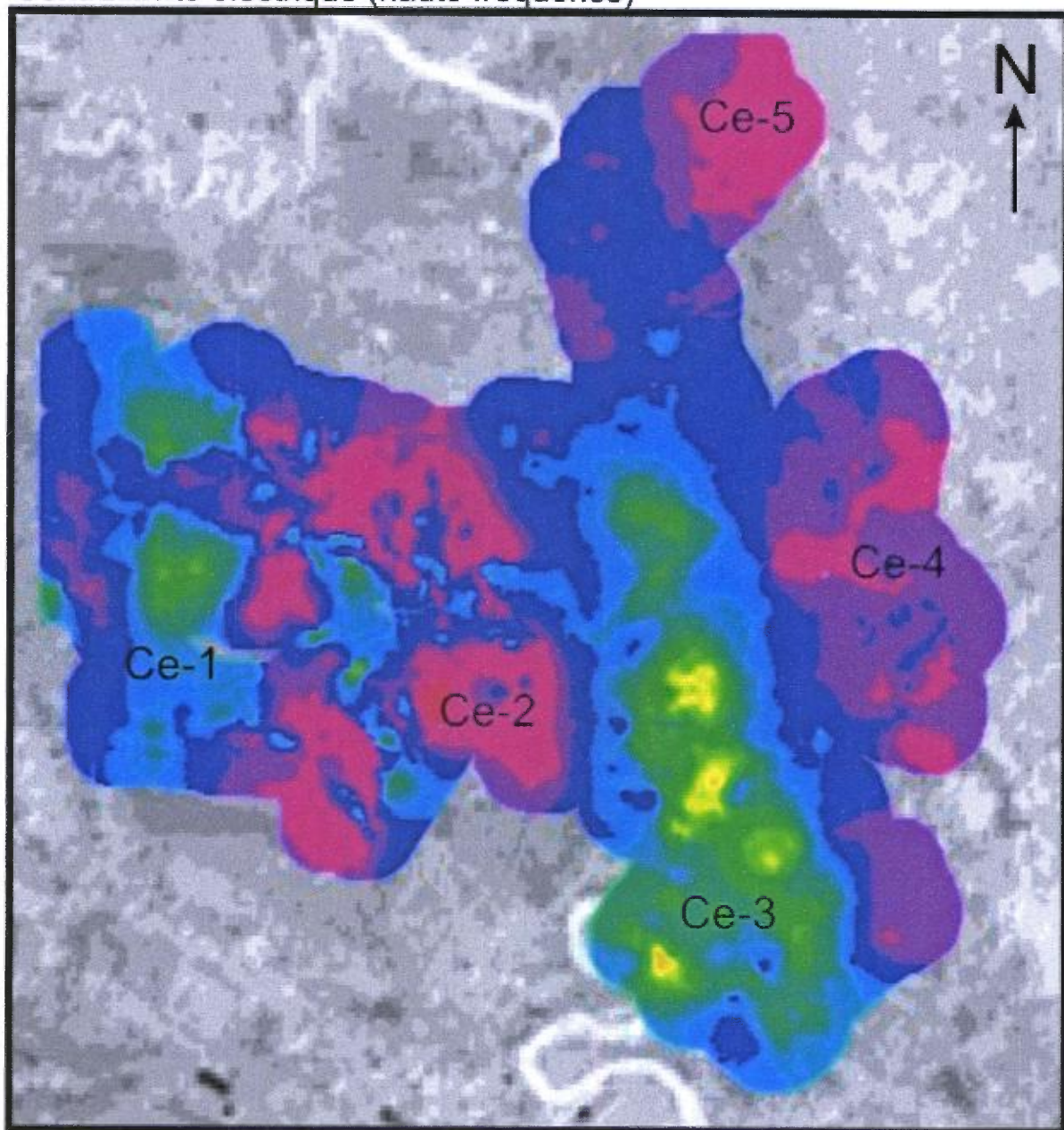


Figure 36. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 4530 Hz. Périmètre nord de Baie-St-Paul.

4.2.2.2 *Fréquence intermédiaire (1830 Hz)*

Cette fréquence d'induction intermédiaire et plus pénétrative permet d'observer des variations de conductivité électrique entre la surface et approximativement 10 m de profondeur. Notez que cette profondeur peut varier en fonction de la conductivité des matériaux présents. Cette épaisseur de matériaux correspond dans ce secteur au sol naturel (ou agricole) et à son substrat dominé par des tills, des dépôts fluvio-glaciaires et des dépôts argileux marins.

La carte de conductivité électrique, pour une fréquence d'induction de 1830 Hz (Fig. 37), montre une distribution de la conductivité électrique beaucoup plus simple que pour la fréquence d'induction de 4530 Hz. Ceci reflète la nature stratifiée des dépôts présents dans ce secteur.

La partie ouest du périmètre (secteur de la ferme Simard) est relativement isotrope avec des valeurs de conductivité électrique relativement peu variées (Fig. 37). Localement, on observe de petits contrastes de conductivité qui ne semblent pas organisés dans l'espace. Deux zones anomaliques (**Ce-7**) correspondent à des accumulations d'eau (étangs) temporaires localisées dans des petites dépressions topographiques formées sur des sols argileux mal drainés.

La partie comprise entre la rivière du Gouffre et le chemin St-Laurent (côté Est de la vallée) (**Ce-3**) montre encore la présence de l'unité d'argiles marines conductrices indiquée sur la figure 36. L'observation de cette unité à cette fréquence d'induction montre que l'unité argileuse est beaucoup plus épaisse du côté est que du côté ouest de la rivière du Gouffre.

Le secteur situé à l'est du chemin St-Laurent (**Ce-4**) est marqué par une conductivité électrique relativement homogène. Ce secteur est marqué par la présence de dépôts fluvio-glaciaires (Fig. 6). En montant dans les coteaux, la conductivité devient un peu plus faible et irrégulière en raison de la présence de tills et localement de roches calcaires sub-affleurantes. Ces affleurements sont relativement abondants dans le secteur **Ce-5**.

Baie-St-Paul (périmètre nord)

Conductivité électrique (fréquence intermédiaire)

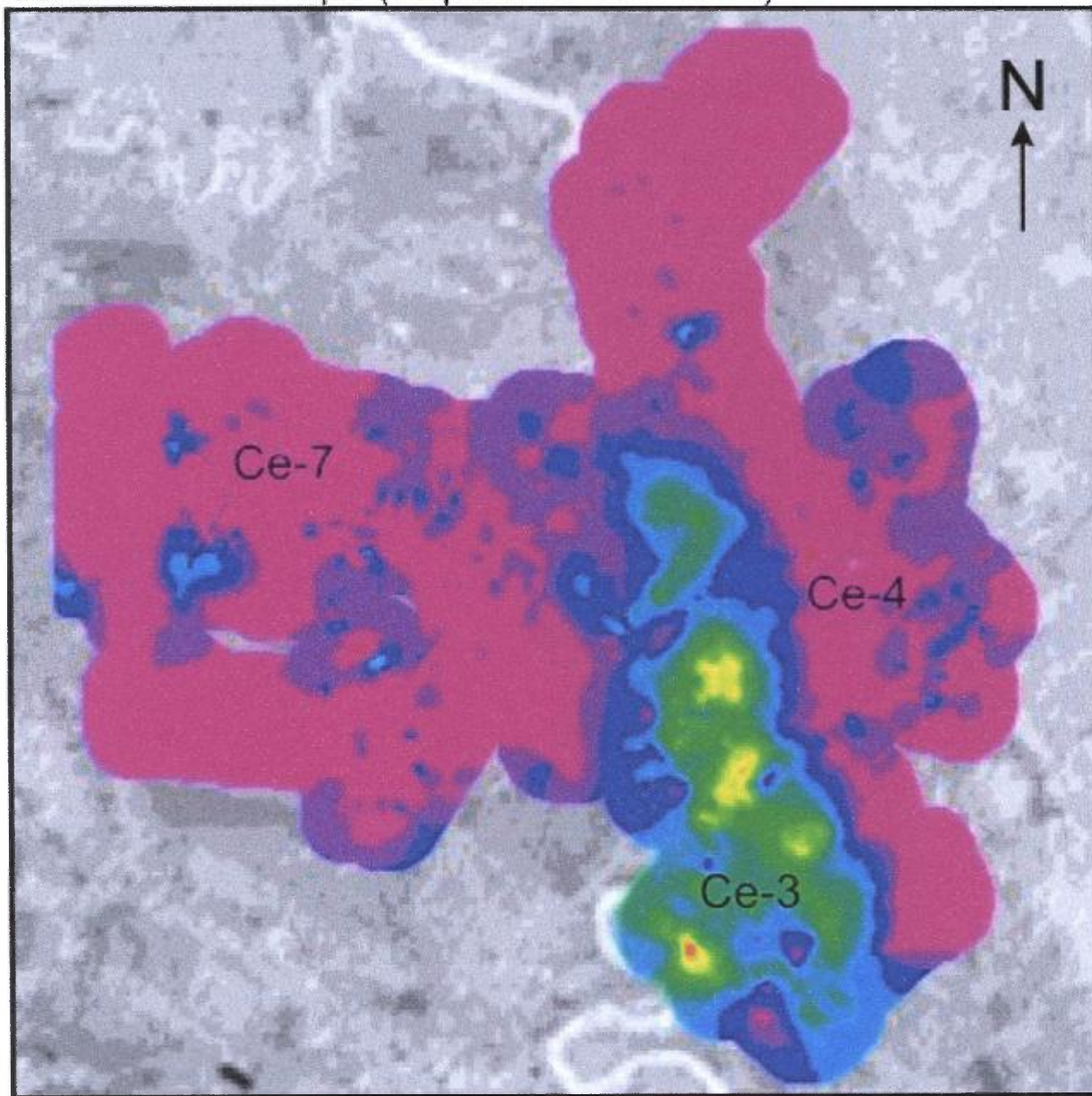


Figure 37. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 1830 Hz.

4.2.2.3 Basse fréquence ((630 Hz)

Cette basse fréquence pénétrative permet d'observer des variations de conductivité électrique entre la surface et approximativement 20m de profondeur. Cette épaisseur de matériaux correspond dans ce secteur au sol naturel (ou agricole) et aux substrats dominés par des tills, des dépôts fluvio-glaciaires et des dépôts argileux marins mais aussi localement par le socle rocheux qui est représenté par des roches calcaires.

La carte de la figure 38 montre une distribution de la conductivité électrique beaucoup plus simple que pour une fréquence d'induction à 4530 Hz mais toutefois un peu plus complexe que pour la fréquence d'induction de 1830 Hz. Cette carte est dominée par la présence de matériaux plus résistifs (en mauve sur la carte) distribués dans les différentes parties du périmètre nord. Contrairement à la carte de la figure 37, celle de la figure 38 montre l'apparition de zones plus conductrices situées vraisemblablement plus en profondeur. Ces zones sont représentées en bleu sur la carte (Ce-8). Dans la partie centre-ouest de la carte, ces anomalies sont observées dans un secteur ayant été impliqué dans des glissements de terrain. Il sont donc situés à plus faibles altitudes que le plateau agricole bordant le boulevard Mgr de Laval.

Les valeurs de conductivité électrique observées sur la carte de la figure 38 suggèrent présence d'une troisième couche de matériaux caractérisée par des matériaux plus résistifs (sableux) situés plus en profondeur. Ces derniers sont observés dans la partie inférieure de falaises abruptes localisées le long du côté est de la rivière du Gouffre.

La bande d'argiles marines située entre la rivière et le chemin St-Laurent montre encore une signature conductrice qui est toutefois atténuée en intensité mais aussi en largeur par rapport aux valeurs observées sur les cartes de conductivité électrique à plus hautes fréquences d'induction (Ce-3). Ceci suggère que l'unité argileuse s'atténue rapidement en profondeur pour laisser la place à une unité moins conductrice. Contrairement à la figure 37, figure 38 montre une discontinuité dans la distribution spatiale de l'unité d'argiles marines. Cette unité semble disparaître vers le nord. Une forte anomalie (Ce-9), non identifiée aux fréquences de 1830 et 4530 Hz, d'orientation NE-SO est présente à la limite nord de l'étendue d'argiles marines. L'anomalie est très forte en intensité et de forme rectangulaire allongée vers le NE. Compte tenu de l'absence de signatures anomaliques en haute fréquence, la structure responsable de cette anomalie est nécessairement profonde et ne peut être identifiée à partir de la surface. De plus, cette anomalie n'a pas de correspondance magnétique

sur la carte présentée à la figure 35. Une vérification des registres municipaux devra être faite dans le but de vérifier l'utilisation antérieure des terres agricoles dans ce secteur (ex. présence d'un ancien site d'enfouissement de déchets ?).

La remontée du socle rocheux calcaire dans les coteaux de la partie est de la vallée de la rivière du Gouffre est fortement suggérée par les faibles valeurs de conductivité électrique observées dans ce secteur (Ce-10) (Fig. 38). Notez que l'équipe de terrain a observée de nombreux affleurements de calcaire dans ce secteur.

Baie-St-Paul (périmètre nord)

Conductivité électrique (basse fréquence)

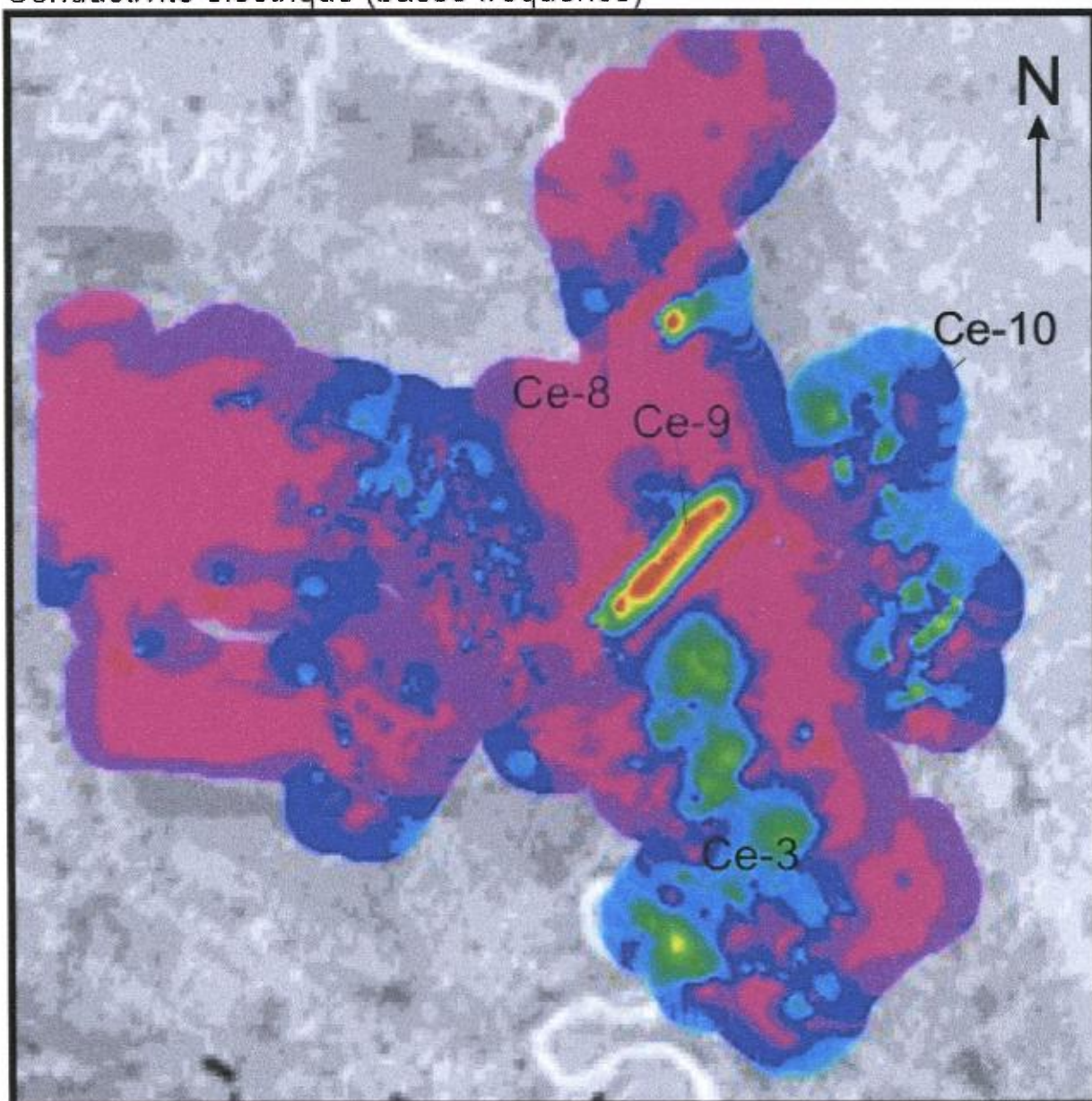


Figure 38. Carte des données krigées de conductivité électrique mesurées pour une fréquence d'induction électromagnétique de 630 Hz.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans ce projet nous avons présenté les résultats des travaux de levés géophysiques au sol réalisés dans deux périmètres situés au sud et au nord de la ville de Baie St-Paul (Charlevoix). Ces travaux avaient plusieurs objectifs dont celui de préciser la géologie d'une partie du bassin versant de la rivière du Gouffre à la hauteur de Baie-St-Paul. Le choix de ce secteur reposait sur l'élargissement maximal de la vallée du Gouffre dans cette région et l'observation sur les flancs est et ouest d'affleurements calcaires laissant entrevoir la possibilité de préservation d'une bonne proportion des unités associées au graben de la rivière du Gouffre.

La présence de roches mères de qualité, caractérisées par une maturation thermique dans le domaine de la fenêtre à l'huile, d'un bassin sédimentaire ordovicien impacté par un météorite et d'une succession de dépôts glaciaires et marins quaternaires rend probable la présence de gîtes d'hydrocarbures thermogéniques ou biogéniques dans ce secteur. Toutefois, en l'absence de données géologiques, géophysiques et chimiques suffisantes, nous ne pouvons confirmer le potentiel de ce secteur géologiquement complexe et encore actif de nos jours (glissement de terrain, sismicité).

Les données de conductivité électrique obtenues suite au levé d'induction électromagnétique en domaine de fréquence ont permis de tracer plusieurs cartes de conductivité électrique pour des fréquences d'induction allant de 630 à 4530Hz. Ces cartes permettent de visualiser les variations dans la nature et la distribution spatiale des dépôts glaciaires et marins ainsi que localement du socle rocheux dans la région. Elles permettent également de préciser des perturbations locales d'origines variées. Entre autre, nous avons localisé un réseau de drainage ancien orienté NE-SO qui est perpendiculaire au réseau de drainage actuel de la vallée. L'activité sismique dans ce secteur, responsable de grands glissements de terrain dans la partie amont de la vallée, est probablement responsable de ces perturbations.

La localisation géophysique de matériaux argileux est pertinente pour l'exploration de gîtes de gaz en milieu sédimentaire non-consolidé (ex. gîte de gaz de Pointe-du-Lac). Les cartes de conductivité électrique présentées dans ce rapport seront utiles pour évaluer le potentiel en gaz naturel des formations sédimentaires non consolidées qui se sont accumulées dans la vallée du Gouffre.

La carte des levés magnétométriques du périmètre sud montre des anomalies magnétiques majeures ne pouvant être expliquées à partir des informations contenues dans les cartes des dépôts quaternaires et des sols de la région. Ces anomalies sont nécessairement profondes et probablement associées au socle rocheux sous-jacent.

D'autres anomalies semblent reliées à la dynamique sédimentaire actuelle comme celle adjacente au quai de Baie-St-Paul. La signature magnétique et la susceptibilité magnétique mesurées dans les sédiments marins (ou littoraux) des hautes battures de Baie-St-Paul diffèrent de part et autre de la rivière du Gouffre. Les sédiments du côté est de la rivière sont généralement plus magnétiques. Le long de la plage de Baie-St-Paul nous avons observé la présence d'accumulations de minéraux lourds et particulièrement de magnétite (sables noirs) résultant en de fortes susceptibilités magnétiques des sédiments.

La carte du gradient magnétique montre plusieurs petites anomalies circulaires qui pourraient être reliées à des halos d'altération secondaires reliés à la migration d'hydrocarbures vers la surface. En l'absence de données sur la géochimie des hydrocarbures C1-C4 dans ce secteur nous ne pouvons confirmer cette hypothèse.

Suite à ces travaux, nous suggérons de procéder à l'acquisition de données magnétiques additionnelles sur l'estran de Baie-St-Paul pour combler l'absence de données vers le large. Une partie de ces travaux devra être réalisée en bateau à marée haute. Des échantillons de gaz, prélevés en zone vadose des sols, devront être échantillonnés sur les périmètres sud et nord pour restreindre la superficie des zones d'exploration dans le secteur.

Il est recommandé de réaliser des sections tomographiques géoélectriques (résistivité et polarisation induite) afin de préciser l'Architecture d'accumulation des séquences glaciaires et marines et de préciser la profondeur du socle rocheux.

Un levé radiométrique mobile devrait être réalisé pour localiser des halos de lessivage en K et d'enrichissement en uranium habituellement associés aux fuites d'hydrocarbures en sub-surface.

6. REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont participé à la réalisation de ce projet. Francois Pelletier (professionnel de l'INRS) et Edith Chouinard (assistante de terrain) ont assisté MRL pendant les travaux de terrain.

Merci au Dr Geneviève Camiré pour ses nombreux conseils sur la géologie de Baie St-Paul et plus spécifiquement sur le potentiel pétroligène des unités ordoviciennes et aux Drs Denis Lavoie (CGC-Qc) et Rudolph Bertrand (INRS-ETE) pour de très nombreuses discussions sur la géologie et le potentiel en hydrocarbures de cette région.

Merci à M. Pierre Gévry, Président de les Mines JAG Itée pour avoir soutenu et financé ce projet de recherche.

7. RÉFÉRENCES

- Belt, E.S., Riva, J. et Bussières, L., 1979. Revision and correlation of Late Middle Ordovician stratigraphy northeast of Québec City. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16:1467-1483.
- Bussières, L., Merthens, C.J., Belt, E.S. et Riva, J., 1977. Late Middle Ordovician shelf, slope and flysch facies between Baie St-Paul and La Malbaie, Québec. In 69th annual meeting N.E.I.G.C., Québec City, field trip B-9, pp.1-26.
- Camiré, G., et Richer-LaFl eche, M., 2007. Recherche de gaz et de pétrole et mise en valeur de la propriété Charlevoix, Phase 1 – An1, Travaux 2006-2007, rapport d’étape, Les Mines J.A.G. Ltée, 68 pages.
- Carrier, D., 1981. Étude pédologique de la région de Charlevoix. Direction générale de la recherche agricole, Gouvernement du Québec, Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation, 92 pages.
- Chagnon, J.Y., 1969. Étude des phénomènes d’érosion et des dépôts de surface dans la région de Baie-St-Paul-St-Urbain. Ministère des Richesses Naturelles du Québec. ES-3, 33 pages et cartes.
- Dione, J.C., 1979. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et quaternaire*, volume 31, No 1 et 2, pages 6-80.
- Lajoie, G., 1981. Zones expos es aux mouvements de terrain, région de Charlevoix, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, DPV-812, 42 pages.
- Laroche, P. et Richer-LaFl eche, M., 2006. Programme d’exploration propos e sur les permis de recherche de pétrole et de gaz des propriétés Témiscouata, Lac St-Jean et Charlevoix. Rapport 5501 préliminaire, Les Mines JAG Ltée, 43 p.
- Laroche, P., Richer-LaFl eche, M. et Camiré, G., 2008. Programme d’exploration r evis e sur les permis de recherche de pétrole et de gaz des propriétés Témiscouata, Lac St-Jean et Charlevoix. 49 pages. Les Mines JAG Ltée.
- Lemieux, Y., 2001. Analyse structurale des failles supracrustales de la région de Charlevoix, Québec: relations avec l’impact m eteoritique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, 71 p. et 1 carte.
- Lemieux, Y., Tremblay, A. et Lavoie, D., 2003. Structural analysis of supracrustal faults in the Charlevoix area, Quebec: relation to impact cratering and the St-Laurent fault system. *Can. J. Earth Sciences*, 40: 221-235.
- Rondot, J., 1972. La transgression marine ordovicienne dans le comté de Charlevoix. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9 : 1187-1203.

Complété à Québec, le 10 septembre 2008

Par : Marc Richer-LaFlèche



Marc Richer-LaFlèche, géo. (no. permis : 1055)

Annexe 1

Méthode de traitement des données géophysiques

Compilation des données

Les données recueillies dans le cadre de ce projet ont été compilées à l'aide du logiciel SAS V9. Les données aberrantes (absences de coordonnées GPS associées aux mesures géophysiques, valeurs en dehors d'une plage de valeurs réalistes) ont été éliminées. Nous avons vérifié que les valeurs de conductivité électrique n'étaient pas influencées par la proximité de lignes électriques à haute tension en fixant une valeur seuil de 0.1 à la variable de contrôle (Power Line) mesurée par notre appareil. La totalité de ces observations représentaient moins de 0.01% des observations totales. La projection spatiale de données éliminées en raison des valeurs fortement divergentes nous a permis de vérifier qu'elles n'étaient pas regroupées dans l'espace et ne correspondaient donc pas à des secteurs de fortes anomalies mais bien à des données éparpillées.

Correction des mesures pour les oscillations du champ magnétique

Les mesures de champ magnétique total ont été corrigées pour les variations diurnes du champ magnétique terrestre. Trois stations de base ont été disposées dans la région de Baie Saint-Paul. Ces stations fixes ont enregistré les variations de champ magnétiques terrestre au cours du temps. L'oscillation du signal non attribuable aux variations géographique a été soustraite des données mesurées.

Anomalies

Les anomalies géophysiques d'intérêt ont été identifiées comme des valeurs extrêmes par rapport aux mesures effectuées dans le même secteur géographique. Pour les identifier, on a associé à chaque mesure géophysique, une moyenne et un écart-type calculés sur toutes les mesures environnantes (situées dans un rayon de 200 m). L'écart entre la valeur mesurée en un point et la moyenne locale a été reclassé en termes d'écart type (1, 2, 3 et 4 sigma). Les valeurs divergentes de plus de 2 sigma ont été interprétées comme des valeurs anomaliques par rapport à leur contexte spatiale.

Élimination de la variance résiduelle

Les mesures de champ magnétique total, de conductivité électrique et les données radiométriques ont été corrigées pour l'erreur résiduelle associée aux mesures recueillies par les différents instruments géophysiques. Lors d'une station prolongée sur un même site, les capteurs ont répétées des mesures qui sans l'erreur résiduelle devraient être égales. La variance des mesures a été calculée pour tous les sites possédant au moins 20 enregistrements. La variance résiduelle moyenne a été calculée pour l'ensemble des sites retenus. Un lissage des données à l'aide de régressions spatiales non paramétriques (LOESS) a permis de soustraire du signal cette variabilité. Une surface a été ajustée automatiquement sur les données. Le paramètre de lissage a été sélectionné par optimisation du critère de cross-validation généralisé (Craven and Wahba, 1979). Nous avons vérifié que les résidus associés aux valeurs prédites étaient situés à l'intérieur de la plage de variance résiduelle calculée précédemment.

Variogramme

Lorsque la densité de points de mesure était suffisante nous avons procédé à l'interpolation des données afin de produire des représentations cartographiques des variations des mesures géophysiques.

Le semi-variogramme a été calculé pour les $n(h)$ points x_i et y_i séparés par une distance $h = |x_i - y_i|$ (intervalle inter-points) à l'aide de l'équation:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2$$

Une première observation de la distribution de la semi-variance en fonction de différents intervalles inter-points a permis de sélectionner un modèle théorique de type exponentiel (Journel and Huijbregts, 1978):

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 * (1 - \exp(-(h^2)/a^2))$$

Où C_0 , C_1 et a , sont trois constantes, l'ordonnée à l'origine (la pépite), la limite asymptotique de la semi-variance (le plateau) et la portée.

La paramétrisation des modèles de variabilité spatiale détermine en fin de processus les productions cartographiques. Afin de ne pas introduire de biais dans l'estimation, la recherche du meilleur modèle de a a été effectuée de manière automatisée (langage macro dans SAS). Une gamme de valeur (de 1 à 200 m) pour h a été balayée à un pas de 1 m. Pour chacune des valeurs de h , le variogramme expérimental a été calculé. Les paramètres du modèle exponentiel théorique (C_0 , C_1 et a) ont été ajustés de manière automatisée par régression non-linéaire en minimisant la somme des carrés des erreurs. Le critère d'Akaike (AIC) a été calculé comme mesure de l'adéquation entre le modèle et les données (Akaike, 1983). Ce critère est largement employé lorsqu'il s'agit de sélectionner un meilleur modèle parmi un ensemble de modèles candidats (Burnham and Anderson, 2002). A la fin du processus, le modèle et l'intervalle correspondant au meilleur ajustement des données (plus faible valeur d'AIC) a été retenu (Webster and McBratney, 2006).

Krigeage

Pour procéder à l'interpolation spatiale, la fonction $F(x)$, où $x = (x,y)$, a été estimée en un point x_p du plan à partir de valeurs connues de F en un certain nombre, m , de points environnants x_i avec l'équation :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i)$$

Où W_i , est la pondération de chacun des points environnants. Le semi-variogramme calculé à l'étape précédente a été utilisé pour déterminer les poids W_i . Le type krigeage retenu est un krigeage univarié ordinaire (variable stationnaire de moyenne inconnue) des données. Les poids W_i ont été obtenus en résolvant l'équation:

$$A \cdot W = B$$

Où A, W et B sont les matrices :

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1m}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2m}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{m1}) & \gamma(h_{m2}) & \dots & \gamma(h_{mm}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_m \\ \lambda \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \dots \\ \gamma(h_{mp}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

λ est un multiplicateur de Lagrange introduit pour que la somme des poids W_i , soit égale à 1 dans le but de minimiser l'erreur d'estimation (Davis, 1986). Pour calculer W il s'agit alors d'inverser A.

Le krigeage a été effectué dans Matlab. Une valeur a été estimée tous les 5 m. Cette résolution étant permise par la densité initiale des mesures et leur cohérence spatiale. Les algorithmes utilisés sont dérivés de ceux proposés dans GSLIB (Deutsch and Journel, 1992). Nous avons vérifié que les données respectaient les conditions d'applications du krigeage: la stationnarité de premier et de deuxième ordre. Pour ce faire, nous avons cartographié la moyenne et la variance des mesures géophysiques et nous nous sommes assurés de l'absence de grande tendance significative dans l'espace.

Cartographie

Les estimations ont été spatialisées dans ArcGis V9.2. L'erreur d'estimation augmentant avec la distance aux données mesurées, la cartographie a été restreinte à un rayon de 100 m des données mesurées. Dans ArcGis, cette opération a été réalisée en définissant une enveloppe de 100 m autour des points mesurés a été créé (outil buffer). Elle a servi de masque pour extraire les points estimés situés à l'intérieur (outil clip).

Références bibliographiques

- Akaike H. Information measures and model selection. Bulletin of the International Statistical Institute 1983; 50: 277-290.
- Burnham KP, Anderson DR. Model selection and multimodel inference. A practical information-theoretic approach. New York: Springer-Verlag, 2002.
- Craven P, Wahba G. Smoothing Noisy Data with Spline Functions. Numerical Mathematics 1979; 31: 377 - 403.
- Davis JC. Statistics and Data Analysis in Geology, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- Deutsch CV, Journel AG. GSLIB - Geostatistical Software Library. New York: Oxford University Press, 1992.
- Journel AG, Huijbregts CJ. Mining Geostatistics: Academic Press, 1978.
- Webster R, McBratney AB. On the Akaike Information Criterion for choosing models for variograms of soil properties. European Journal of Soil Science 2006; 40: 493 - 496.