

Essai d'un levé d'induction électromagnétique en domaine de fréquence pour
mesurer la conductivité électrique des sédiments du lac St-Pierre (Qc).

et

Mesures de la susceptibilité magnétique des sédiments de fond
du lac St-Pierre comme outil de caractérisation sédimentaire

Par

Marc R. LaFlèche

INRS-ETE
Université du Québec

et

Magella Pelletier

Centre St-Laurent
Environnement Canada

Février 2005

Table des matières

Section 1 : Levé d'induction électromagnétique sur le lac St-Pierre

Problématique	3
Le milieu physique du lac St-Pierre	5
Méthodologie	6
Sonde EM-31	6
Positionnement par satellite et estimation de la bathymétrie	10
Bateau et logistique sur le lac St-Pierre	11
Prélèvement des échantillons	11
Interprétation des données	12
Conclusions des essais d'induction électromagnétique	16

Section 2 : Susceptibilité magnétique des sédiments du lac St-Pierre

Problématique	17
Méthodologie	17
Interprétation des données	18

Annexe

Problématique

Les processus d'accumulation et de dispersion des contaminants dans les bassins lacustres fluviaux sont complexes en raison de la multitude de sources ponctuelles ou diffuses impliquées et de processus sédimentologiques complexes.

En plus des perturbations chimiques, l'activité agricole, urbaine, industrielle et le maintien des infrastructures de la voie maritime du St-Laurent perturbent le cycle naturel d'érosion et d'accumulation sédimentaire. Dans le cas du lac St-Pierre, ces processus sont critiques car la charge particulaire est très importante et la bathymétrie relativement faible. Plusieurs études récentes tendent à démontrer une accélération du taux d'accumulation sédimentaire en parallèle à une diminution généralisée de l'épaisseur de la colonne d'eau du fleuve. L'impact de ces processus sur l'évolution à court ou moyen terme du bassin du lac St-Pierre est difficile à modéliser entre autre de par la faible densité d'information sur la distribution spatiale des sédiments du lac.

Pour comprendre à la fois les processus d'érosion et de sédimentation et les processus de transport et d'accumulation des contaminants, il est impératif de mieux connaître la dynamique sédimentaire du bassin. Toutefois, l'immensité du bassin (plus de km²) et la complexité des faciès sédimentaires observés (grande variabilité spatiale) rend problématique toutes tentatives d'interpolation des données sédimentologiques obtenues par carottage.

Pour minimiser ce problème, il serait nécessaire d'augmenter d'un facteur 100 ou 1000 le nombre de stations de carottage sédimentaire. Compte tenu de la complexité logistique et des coûts inhérents à une telle procédure, il serait économiquement impensable de procéder de cette façon. En utilisant des méthodes d'investigation indirectes comme l'induction électromagnétique nous croyons pouvoir cartographier les variations de conductivité électrique des sédiments de fond du lac avec une haute résolution. Étant donné que l'expérimentation et les données publiées dans la littérature scientifique montrent que les matériaux grossiers (sables grossiers, galets) sont électriquement moins conducteurs que les sédiments fins argileux il serait théoriquement possible d'établir une réponse granulométrique aux variations de conductivité mesurées par induction électromagnétique. Ainsi des dizaines de milliers de données ponctuelles seraient disponibles pour obtenir une carte des faciès sédimentaires du bassin du lac St-Pierre.

Dans cette étude nous préconisons l'utilisation d'une sonde d'induction électromagnétique (EM-31 de *GEONICS*) fonctionnant en domaine de fréquence. Dans ce mode, la conductivité des matériaux est directement proportionnelle à la signature en quadrature du champ électromagnétique secondaire. Nous n'avons pas voulu augmenter la distance entre l'émetteur et le récepteur (ex. sonde EM-34) ni diminuer la fréquence d'émission du champ électromagnétique primaire pour minimiser la pénétration verticale. Ainsi, nos données permettent d'investiguer le premier 6 mètres de matériaux présents sous la sonde d'induction. Ainsi, les mesures sont affectées par la colonne d'eau d'environ 2 à 4 m d'épaisseur et par les deux premiers mètres de sédiments accumulés sur le fond du lac.



Localisation géographique du lac St-Pierre

Le milieu physique du lac St-Pierre

Le lac Saint-Pierre a une superficie de 480 km^2 . Sa largeur maximale est de 16 km et sa longueur est de 43 km. A l'exception de la voie maritime, où elle atteint plus de 10 mètres, la profondeur moyenne du lac est de 3 mètres. Au moment de la crue printanière, qui s'échelonne sur une période de cinq à neuf semaines (du début d'avril au début de juin), la superficie du lac s'accroît d'environ 37 %, passant de 480 km^2 à près de 660 km^2 .

En plus du fleuve Saint-Laurent, qui contribue en moyenne pour $9725 \text{ m}^3/\text{s}$ d'eau à l'entrée du lac, 14 affluents alimentent le lac Saint-Pierre. Ceux-ci drainent une superficie de $46\,075 \text{ km}^2$ et créent un débit moyen annuel de $777 \text{ m}^3/\text{s}$.

En période de crue, les eaux du lac débordent sur la plaine riveraine. Les bordures riveraines peu pentées accentuent la superficie de la plaine inondée et près de 14 000 hectares sont immergés une année sur deux.

Les eaux du lac ne constituent pas un mélange homogène. Ainsi, les eaux de la partie centrale du lac Saint-Pierre sont celles provenant des rapides de Lachine; celles de la rive nord sont constituées des apports des principaux affluents de la région de Montréal; les eaux de la rive sud sont celles des rivières appalachiennes comme la Richelieu, la Yamaska et la Saint-François. Ces différentes masses d'eau de densité différente ne se mélangent que lentement.

Dans le cas de levés géophysiques, le facteur d'individualisation des masses d'eau est important car les propriétés physiques de la colonne d'eau vont varier en fonction de la distance parcourue sur le lac. De plus en période de crue printanière, les hautes eaux débordent latéralement et recouvrent des zones qui le reste de l'année subissent des processus pédogénétiques pouvant modifier les propriétés physiques des matériaux inondés.

Méthodologie

Sonde EM-31

Une sonde à induction électromagnétique EM-31 (de *Geonics*) fonctionnant en domaine de fréquence a été utilisée pour vérifier la possibilité de mesurer les variations de conductivité des sédiments de fond du lac St-Pierre. Ces données ont été acquises le long de deux trajets présentés sur la figure 3. La fréquence utilisée est de 9.8 kHz. La pénétration verticale de ces levés est fonction de la fréquence utilisée et de l'espacement entre l'émetteur et le récepteur (3,66 m). Ainsi, dans le cas d'une configuration avec dipôles verticaux, les signaux observés pour une induction à 9800 Hz permettent d'investiguer les premiers 6 m sous l'interface eau-atmosphère.

L'instrument peut être manipulé par une seule personne et peut fonctionner en modes continu ou discontinu. Lors du levé, l'appareil mesurait en mode continu (1 mesure par seconde) les composantes en phase et en quadrature du champ électromagnétique (figures 1 et 4). Les données de la composante en quadrature peuvent être transformées en données de conductivité apparente. D'un autre côté, les données de la composante en phase reflètent indirectement les variations de susceptibilité magnétique observées dans les sédiments.

Le bruit de fond de l'appareil est de 0,1 mS/m pour la conductivité (signal en quadrature) et de 0,03 ppt pour le signal en phase. La précision instrumentale est de 5% pour une mesure de l'ordre de 20 mS/m.

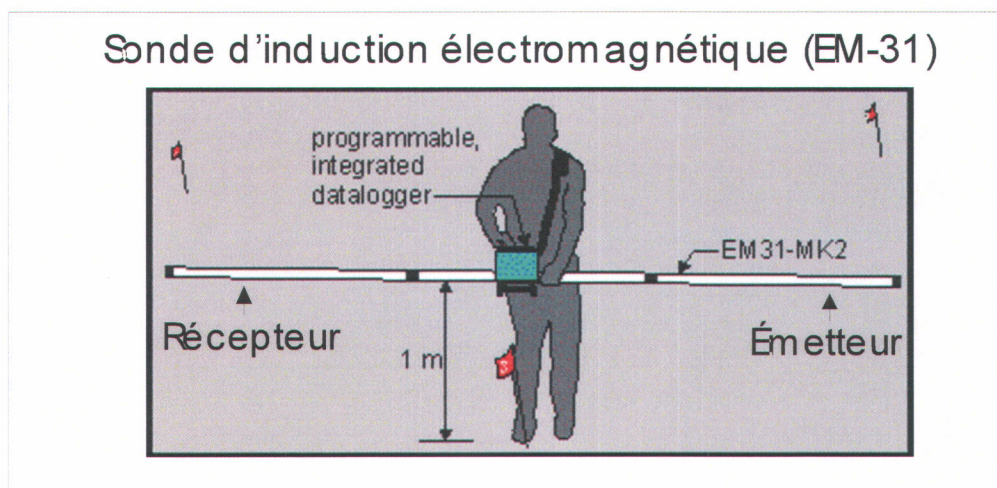


Figure 1 .Représentation schématique d'une sonde d'induction électromagnétique EM-31.

Il est important de souligner que la mesure de conductivité enregistrée par la sonde d'induction EM-31 intègre les propriétés de conductivité électrique de l'air, de l'eau et des sédiments de fond. Pour l'air, la contribution à la conductivité mesurée est négligeable car la résistivité de l'air tend vers l'infini. A l'opposé, l'eau du lac St-Pierre à cette période de l'année a une conductivité de l'ordre de 160 uS/cm ou de 16 mS/m. Compte tenu de l'atténuation verticale de l'induction électromagnétique, reflétée par la fonction de réponse cumulée, une épaisseur d'eau trop importante rend impossible la mesure de conductivité des sédiments. Par exemple, nous avons calculé la fonction de réponse et portée cette dernière en fonction de la profondeur (figure 2). Cette figure montre que la fonction de réponse atteint

70% du signal à une profondeur d'environ 6 m (pour un dipôle vertical). Ceci implique que des sédiments présents à plus de 6 m de profondeur ne vont contribuer qu'à 25% du signal. Cette démonstration démontre l'importance de bien évaluer la bathymétrie lors du levé d'induction électromagnétique.

Certaines formulations mathématiques que nous utiliserons dans ce rapport permettent de tenir compte des propriétés physiques de la colonne d'eau dans le calcul de conductivité apparente des sédiments de fond. Pour calculer ces données il faut idéalement contraindre certaines variables comme l'épaisseur de la colonne d'eau, la conductivité électrique de l'eau (mesurée à l'aide d'un conductimètre). Notons que lors d'un levé systématique du lac St-Pierre, des données de conductivité de l'eau devra être mesurée fréquemment car les masses d'eau sur le lac St-Pierre montrent de forts contrastes de conductivité électrique. En particulier, il faut faire attention aux masses d'eau de la partie sud et nord du lac St-Pierre respectivement affectées par des tributaires appalachiens et d'autres provenant du bouclier canadien. De plus, notons que la partie aménagée de la voie maritime canalise les eaux des Grands Lacs.

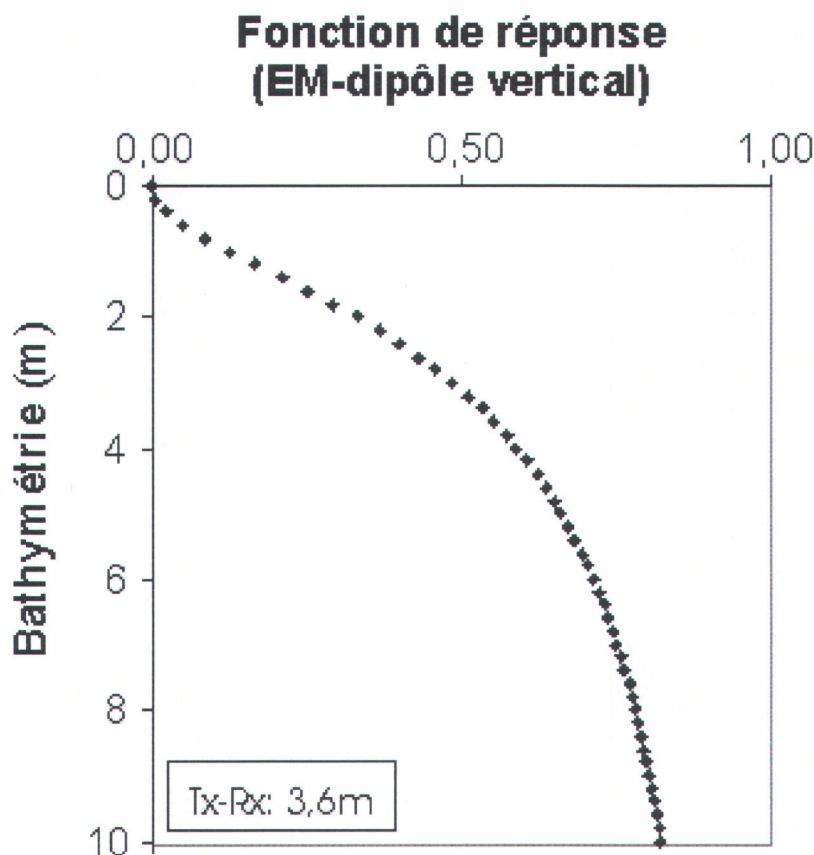


Figure 3. Variation de la fonction de réponse lors de l'induction électromagnétique portée en fonction de la profondeur. Notez qu'à plus de 6 mètres, les matériaux ne peuvent contribuer qu'à moins de 25% du signal.

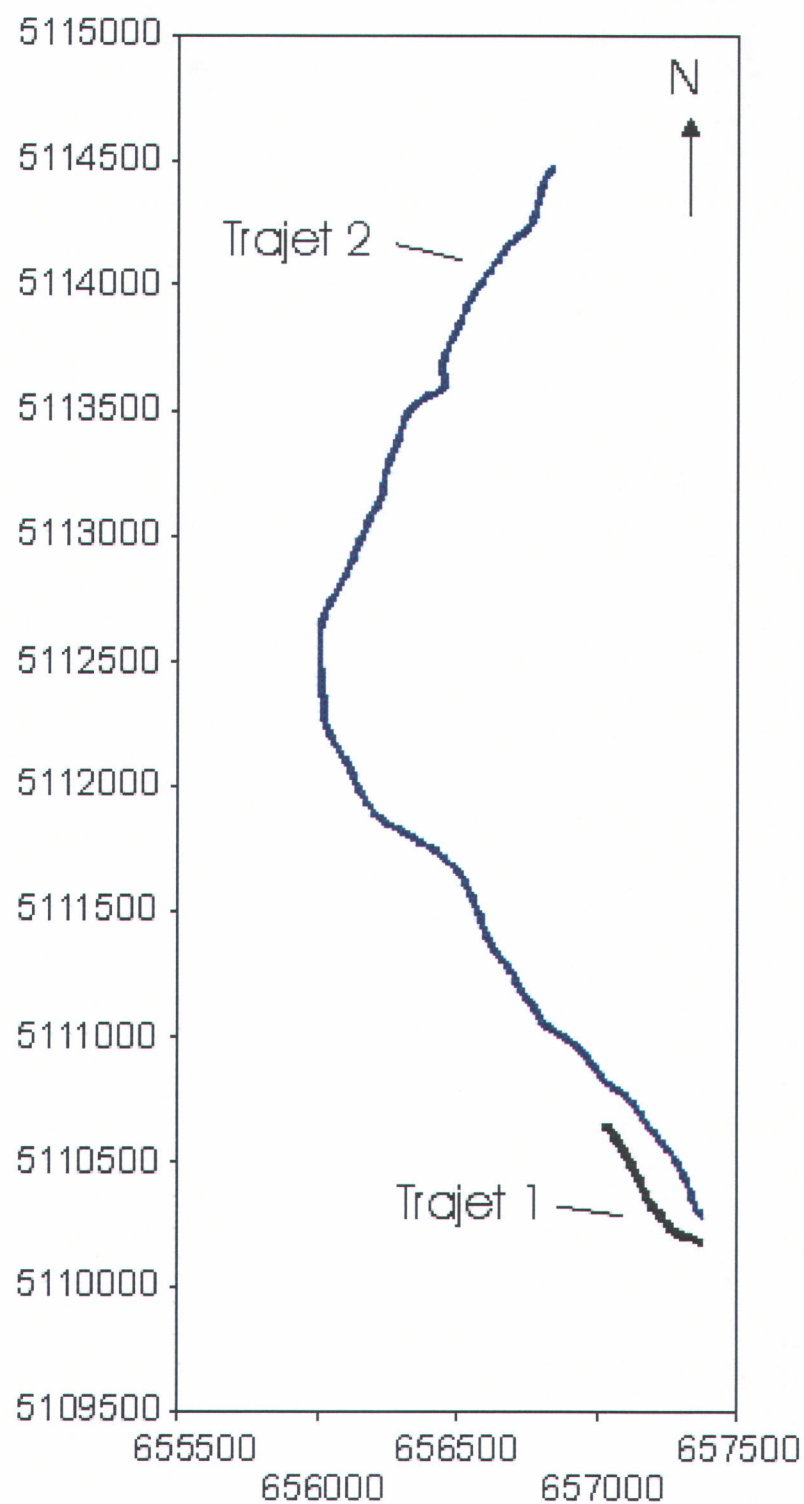


Figure 4. Trajectoires de navigation lors des essais de levé d'induction électromagnétique sur le lac St-Pierre (Mai 2004).



Figure 5. Sonde d'induction électromagnétique EM-31 de Geonics inc. fixée sur un canot pneumatique ne possédant aucune structure métallique.

Positionnement par satellite et estimation de la bathymétrie

Lors du levé géophysique le système de navigation du bateau d'Environnement Canada était couplé à un système de positionnement par satellite d'une résolution sub-métrique (système CSI). Ainsi, le positionnement du bateau et sa vitesse sur l'eau ont été mesurés en fonction du temps. En moyenne, le bateau naviguait à une vitesse moyenne de 5,9 km/h. Ces données peuvent ainsi être utilisées pour contraindre le positionnement de la sonde EM-31 lors des différents transects sur le lac.

Pour ce qui est de la bathymétrie, la sonde du bateau était trop imprécise pour produire des données bathymétriques utilisables pour l'interprétation des données géophysiques. Ainsi, nous avons opté pour un calcul de la bathymétrie à partir du niveau de l'eau observé à la station de référence de Sorel et de la carte bathymétrique de haute résolution produite par la Garde Côtière canadienne. Pour les essais présentés dans cette étude, la procédure d'acquisition des données est raisonnable mais lors d'un levé systématique, il serait hautement conseillé de mesurer en temps réel la bathymétrie à l'aide d'une sonde.

Bateau et logistique sur le lac St-Pierre

Pour les essais sur le lac St-Pierre le Centre St-Laurent nous avons utilisé le bateau (figure 5) d'Environnement Canada. Ce bateau dispose des équipements nécessaires au carottage de sédiments, aux prélèvements de sédiments avec des bennes et permet de naviguer en eaux peu profondes. Ce point est important pour accéder aux zones peu profondes du lac.



Figure 5. Photographies du bateau et des membres de l'équipage d'Environnement Canada (Centre St-Laurent) lors des essais en mai 2004.

Prélèvement des échantillons

Après l'acquisition des données géophysiques, l'équipe est retournée à certaines stations situées le long du second transect afin de prélever des sédiments de sub-surface. Cette procédure visait à se procurer des échantillons de sédiments pouvant être utilisés pour établir une conversion des données de conductivité électrique en données granulométriques permettant de mettre en évidence la localisation de faciès sableux, argileux etc.. En l'absence de temps, l'équipe du Centre St-Laurent est retournée à l'été et l'automne 2004 pour échantillonner un nombre plus représentatif d'échantillons.

Les échantillons de sédiment ont été prélevés à l'aide d'une benne (figures 6 et 7). Ce dispositif permet de prélever un échantillon représentatif des premiers 25 cm de la colonne sédimentaire (sous l'interface eau-sédiment).



Figure 6 . Prélèvement d'échantillon de sédiment à l'aide d'une benne. Échantillonnage en mai 2004 le long du transect 2.



Figure 7. Échantillon de sédiments riches en plantes aquatiques du côté nord du lac St-Pierre (transect 2).

Interprétation des données

Lors du levé du mois de mai 2004, nous avons voulu vérifier la réponse de la sonde lorsque utilisée à la surface de l'eau. En réalité, c'est la première fois qu'une telle méthode est utilisée à des fins de cartographie de sédiments d'un lac fluvial. Habituellement, les levés d'induction électromagnétique sont réalisés sur la terre ferme ou d'une façon hélicoptérée (zones montagneuses difficilement accessibles).

Avant de présenter les résultats obtenus il faut aviser le lecteur des limitations physiques du levé d'induction électromagnétique que nous avons réalisé. Premièrement, la fréquence utilisée par l'émetteur est de 9800 Hz et la distance entre l'émetteur et le récepteur (Tx-Rx : 3,6 m) implique une profondeur d'investigation de l'ordre de 6 m. Ainsi, l'obtention de données bathymétriques était indispensable pour s'assurer d'une profondeur d'eau inférieure à cette limite. La bathymétrie moyenne pour le transect 1 était de $3,01 \pm 0,22$ m et pour le second transect de $1,84 \pm 0,78$ m. La figure 8 présente les courbes de variations bathymétriques observées le long des transects géophysiques.

Lac-St-Pierre (mai 2004)

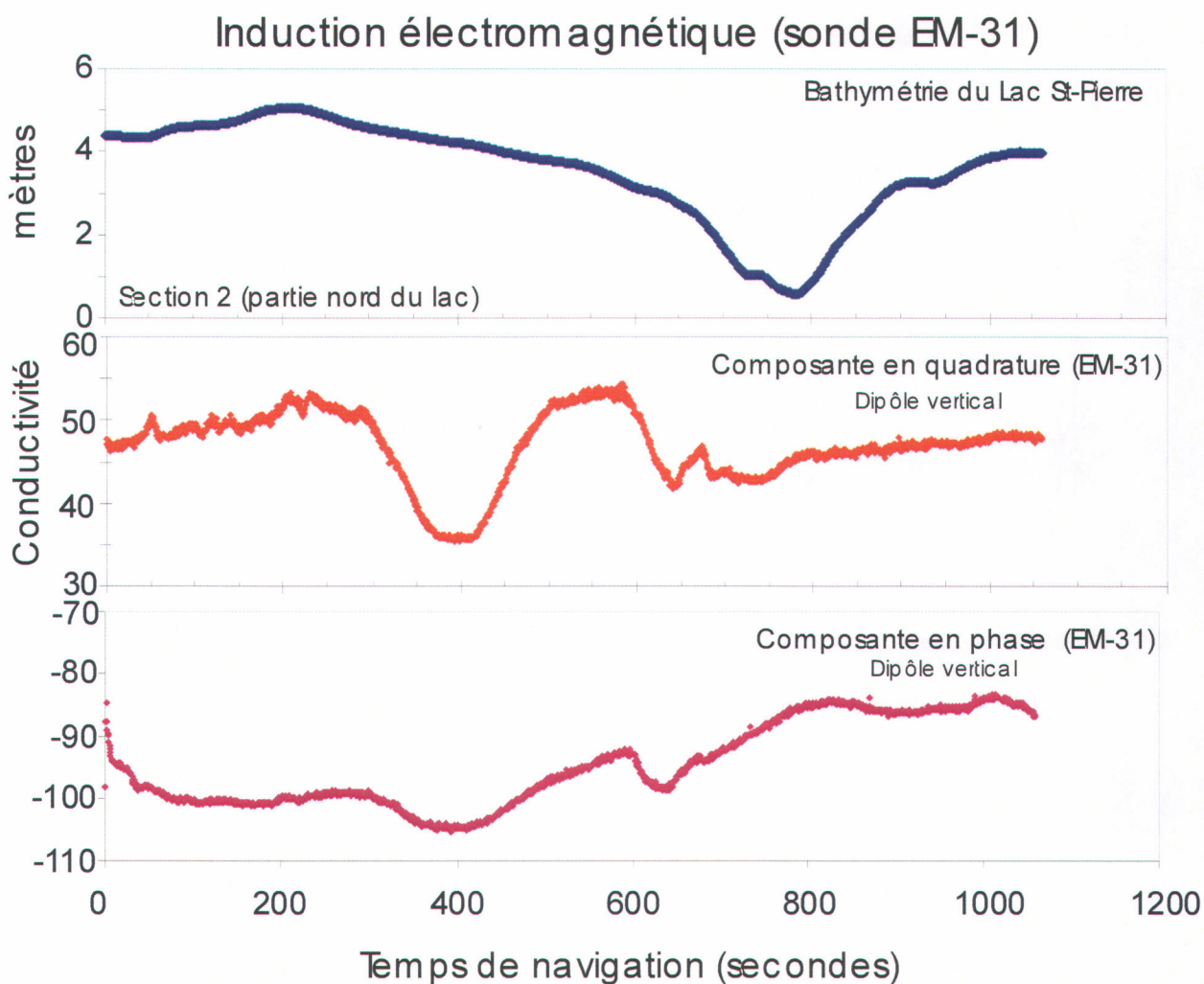


Figure 8. Données des composantes en phase et en quadrature (conductivité). Lors d'une acquisition de 20 minutes sur le lac St-Pierre. Notez l'influence négligeable de la bathymétrie sur la conductivité mesurée et sur la composante en phase. Notez que la composante en phase est fortement influencée par des contrastes de susceptibilité magnétique des sédiments. Les variations observées suggèrent des variations significatives de cette propriété physique le long de la section. La section fait environ 2 km de longueur.

La figure suivante montre l'importance de la correction qui doit être appliquée avant d'utiliser les données de conductivité mesurées par la sonde d'induction électromagnétique. Nous avons choisi une période d'acquisition de 100 secondes qui correspond à une distance de navigation d'environ 170 m. Les résultats du calcul suggèrent fortement que les sédiments de fond ont une conductivité électrique apparente de l'ordre de 140 à 150 mS/m. Ces valeurs sont trois fois plus élevées que les mesures brutes calculées par la sonde EM-31 (figure 9). Notez que la qualité des données de conductivité électrique apparente sera proportionnelle à celles des données bathymétriques et de conductivité électrique mesurées directement à l'aide de sondes aquatiques (sonar, conductimètre).

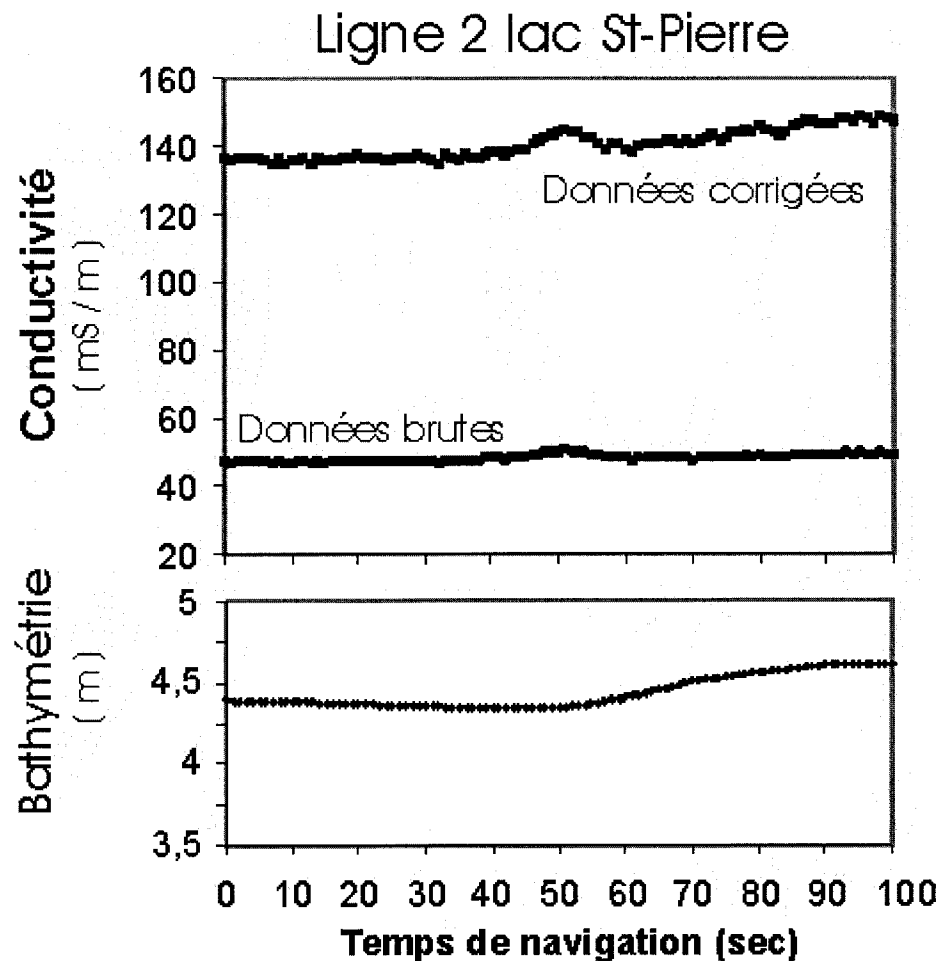


Figure 9. Cette figure montre l'importance de corriger les données de conductivité électrique mesurée par la sonde EM-31 pour tenir compte de la conductivité de l'eau et de l'épaisseur de la colonne d'eau au dessus des sédiments. Les calculs montrent des conductivités de l'ordre de 140 mS/m dans les sédiments pour une lecture instrumentale d'environ 50 mS/m. Notez que les résultats du calcul sont très sensibles à la précision des mesures de conductivité de l'eau et de son épaisseur. Pour fin de calculs, la conductivité de l'eau du lac St-Pierre a été fixée à 16 mS/m.

Afin de bien évaluer l'importance d'une soudaine variation bathymétrique lors d'un levé de haute résolution nous avons modélisé l'influence de la bathymétrie sur la valeur de conductivité mesurée par la sonde EM-31 (figure 10). A la lecture du diagramme, il est évident que les données brutes ne doivent pas être utilisées pour interpréter les variations de faciès sédimentaires. Les données utilisables sont celles calculées pour éliminer la contribution de la conductivité électrique reliée à la colonne d'eau au dessus des sédiments.

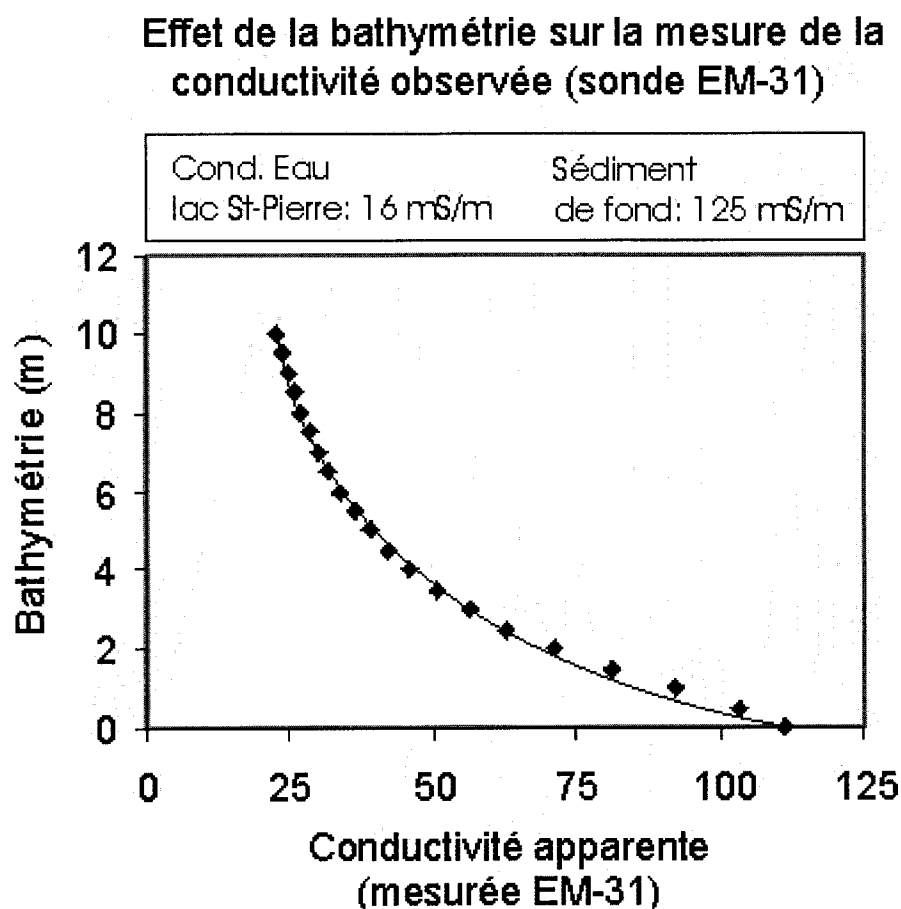


Figure 10. Résultats de modélisation montrant l'effet d'une variation de l'épaisseur de la colonne d'eau au dessus d'une couche de sédiment ayant une conductivité de 125 mS/m. Dans le calcul, l'eau a une conductivité uniforme de 16 mS/m. Notez que les données brutes obtenues par la sonde EM-31 ne peuvent être directement utilisées car une variation bathymétrique de 1 ou de 2 m se répercute par une diminution de conductivité mesurée de 20 à 40 mS/m.

Conclusions des essais d'induction électromagnétique

Les essais réalisés en mai 2004 sur le lac St-Pierre permettent de conclure que l'induction électromagnétique est un choix intéressant pour documenter les variations de conductivité électrique apparente des sédiments de fond du lac et par le fait même pour préciser la nature des faciès sédimentaires. Les résultats de calculs présentés dans ce rapport montrent toutefois que les données mesurées par la sonde EM-31 doivent être transformées pour tenir compte de la conductivité de la colonne d'eau et de son épaisseur. Sachant la conductivité de l'eau et la bathymétrie en un point donné il est possible de calculer une valeur de conductivité électrique apparente des sédiments de fond.

Pour démontrer l'importance de l'épaisseur de la colonne d'eau au dessus de sédiments de fond (caractérisé par une conductivité électrique apparente de 125 mS/m) nous avons modélisé les valeurs qui seraient enregistrées par la sonde EM-31. Ces données montrent qu'une augmentation de la bathymétrie de 1 à 2 m se traduit par une diminution de conductivité mesurée de 20 à 40 mS/m. Ce point démontre de la nécessité de corriger les données de conductivité mesurées (données brutes) en fonction de la bathymétrie.

Dans son mode de dipôle vertical et en fonction d'une fréquence d'émission de 9800 Hz et d'un espacement de 3,6 m entre l'émetteur et le récepteur, environ 75% de la réponse cumulée est observée à une profondeur de 6 m. Pour une colonne d'eau plus importante l'utilisation de la sonde EM-31 est contre-indiquée car la conductivité mesurée reflète essentiellement celle de la colonne d'eau. Il serait possible d'utiliser une sonde EM-34 de Geonics. Toutefois, l'espacement entre l'émetteur et le récepteur est de plus de 20m ce qui limite la résolution spatiale des données. De plus, avec un dispositif EM-34, la pénétration verticale du signal électromagnétique est trop importante ce qui masquerait les informations provenant des premiers mètres de sédiments accumulés sous l'interface eau-sédiment.

Dans des conditions idéales, une sonde bathymétrique sub-métrique équipée d'une sortie de données numériques (digitales) devrait être couplée par un ordinateur à un système GPS sub-métrique. Idéalement le logiciel d'acquisition devrait permettre l'enregistrement des données provenant de la sonde EM-31. Certains logiciels comme HGIS professionnel (Starpal) permettent l'acquisition de données provenant de sources multiples.

Section 2 : Susceptibilité magnétique des sédiments du lac St-Pierre

Problématique

Afin de planifier de futurs travaux en géophysique sub-aquatique sur le lac St-Pierre nous avons vérifié si les sédiments de fond du lac montrent des variations de susceptibilité magnétique. Dans l'affirmatif, ceci impliquerait qu'il serait possible de réaliser un levé magnétométrique systématique du bassin afin de cartographier les variations de faciès sédimentaires. De plus, des travaux récents, réalisés en Ontario, ont montré qu'il est possible de mettre en évidence la présence de sédiments hautement contaminés en modélisant à posteriori les données magnétométriques.

Méthodologie

Pour mesurer la susceptibilité magnétique des échantillons de sédiments nous avons procédé à des mesures à l'aide d'une sonde KT9 (Kattameter) appartenant à la Commission géologique du Canada et d'une sonde GDD-MP1 de l'INRS-ETE. Ces données ont été mesurées sur les échantillons secs provenant de l'étude granulométrique réalisée pour le Centre St-Laurent. Ces échantillons ne respectent plus la géométrie initiale du sédiment ainsi que son contenu en humidité et donc sa porosité. Il est probable que les valeurs de susceptibilité initiales étaient plus contrastées que celles mesurées en laboratoire. Toutefois, rappelons que la susceptibilité magnétique est d'abord influencée par l'abondance de la magnétite contenue dans les sédiments.

Cent échantillons ont donc été utilisés pour mesurer ce paramètre. La distribution des données est présentée sur les histogrammes des figures 11 et 12 .

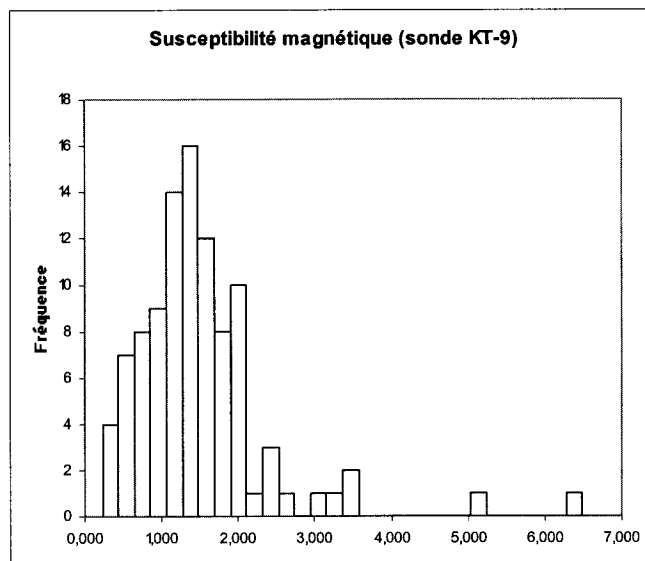


Figure 11. Susceptibilité magnétique mesurée sur les 100 échantillons de sédiments de fond du lac St-Pierre. Notez la distribution asymétrique des données et l'étalement de certaines valeurs. Données mesurées avec la sonde KT9.

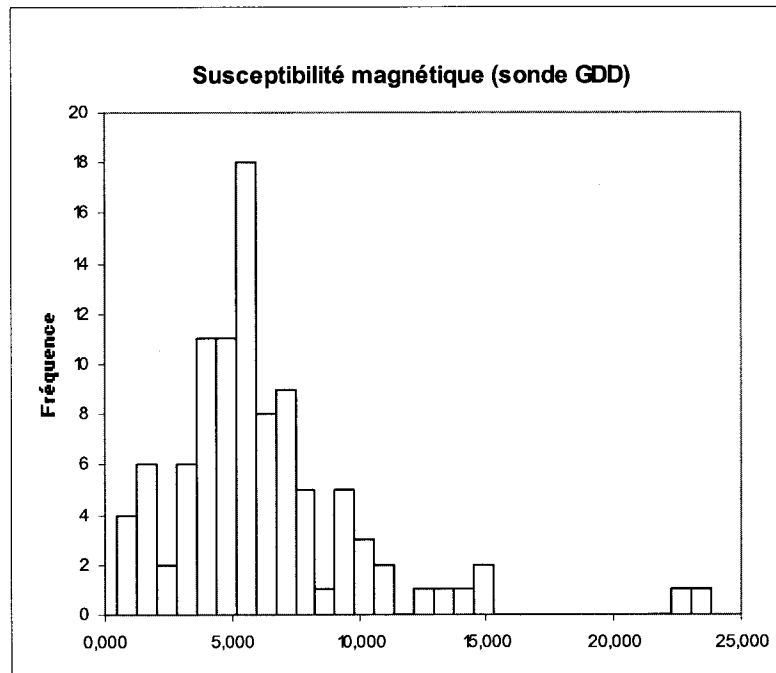


Figure 12. Susceptibilité magnétique mesurée sur les 100 échantillons de sédiments de fond du lac St-Pierre. Notez la distribution asymétrique des données et l'étalement de certaines valeurs. Données mesurées avec la sonde GDD MP1.

Interprétation des données

La mesure de la susceptibilité magnétique d'échantillon est souvent. Afin de vérifier la fiabilité des sondes utilisées nous avons réalisé des mesures à l'aide de deux dispositifs fonctionnant sous différentes fréquences. Dans un premier temps nous avons mesuré la susceptibilité magnétique des 100 échantillons à l'aide du Kattameter KT9 de la Commission géologique du Canada et par la suite nous avons mesuré la susceptibilité magnétique à l'aide de d'une sonde GDD-MP1. Cette sonde est un modèle récent de 2004. La figure 13 montre une bonne corrélation entre les valeurs obtenues avec les deux sondes (le coefficient de corrélation R^2 est voisin de 0,9). Toutefois, notons que les valeurs absolues sont systématiquement plus élevées lors des mesures avec la sonde GDD-MP1. Ceci résulte d'un problème de calibration qui a été résolu dans la version 2005 de la sonde GDD-MP2.

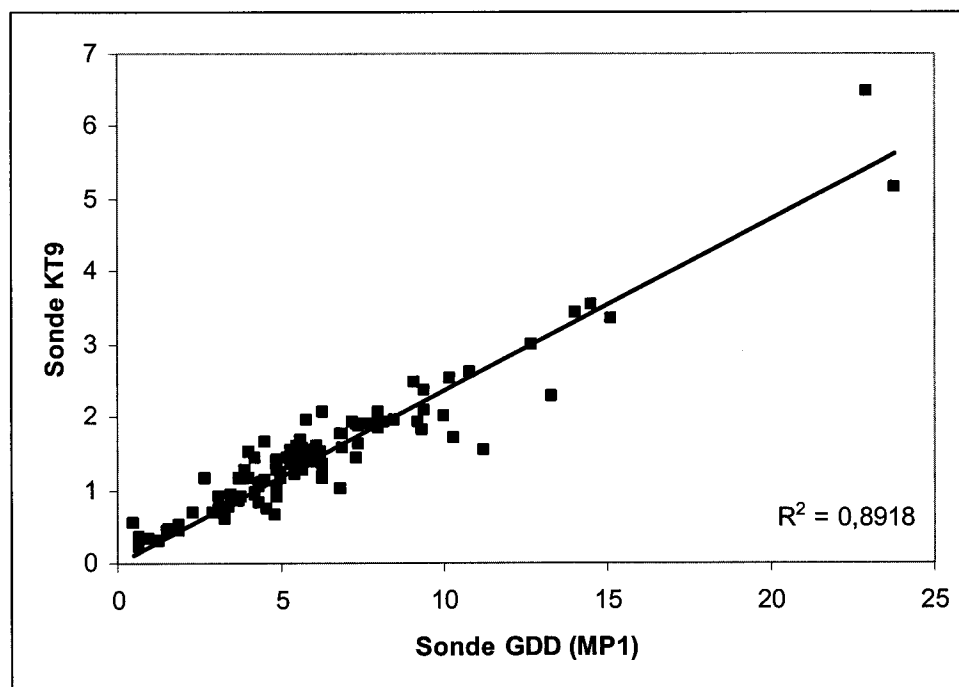


Fig. 13. Comparaison entre les données de susceptibilité mesurées par la sonde GDD-MP1 et la sonde Kattameter-KT9. Notez que la différence des valeurs absolues reflète un problème de calibration interne de la sonde GDD-MP1. Ce problème a été réglé dans la version 2005 de cette sonde (GDD-MP2).

La figure suivante montre des variations de susceptibilité magnétique, mesurées sur les sédiments du lac St-Pierre, en fonction de leurs positions géographiques (figure 14). Avec étonnement nous avons observé une zone à très faible susceptibilité magnétique en se rapprochant des îles de Sorel et donc dans la partie S-O du bassin du lac St-Pierre. Ceci montre la présence d'unités sédimentaires très différentes de part et autre du bassin. Il pourrait s'agir de sédiments fins accumulés en aval des îles de Sorel. Afin de vérifier si cette variabilité de la susceptibilité magnétique reflète une signature primaire des sédiments et non pas un artéfact relié à la contamination des sédiments (ex. par du fer) nous avons rapporté sur la figure 15 la distribution du Zr. Cet élément trace provient de l'érosion des roches et des unités de surface (sols, tills quaternaires, alluvions) bordant le fleuve St-Laurent. Le Zr est un élément extrêmement insoluble dans l'eau (un des éléments le plus réfractaire du tableau périodique), sa distribution ne peut être contrôlée que par des processus sédimentologiques primaires car les sources anthropiques de contaminants ne comportent généralement pas de Zr.

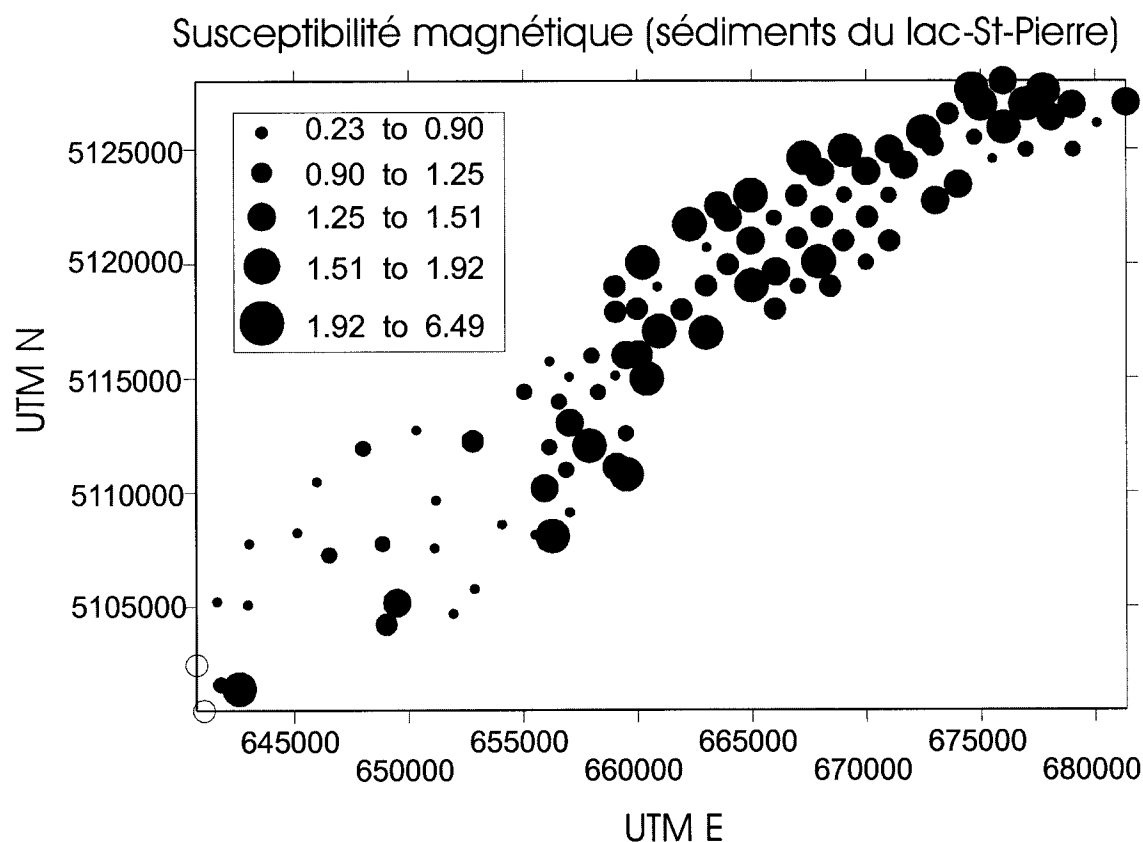


Figure 14. Distribution de la susceptibilité magnétique mesurée dans les sédiments du lac St-Pierre. Notez la forte diminution de susceptibilité magnétique en se dirigeant vers les îles de Sorel (sud-ouest de la carte). Les coordonnées X et Y sont en UTM NAD 27.

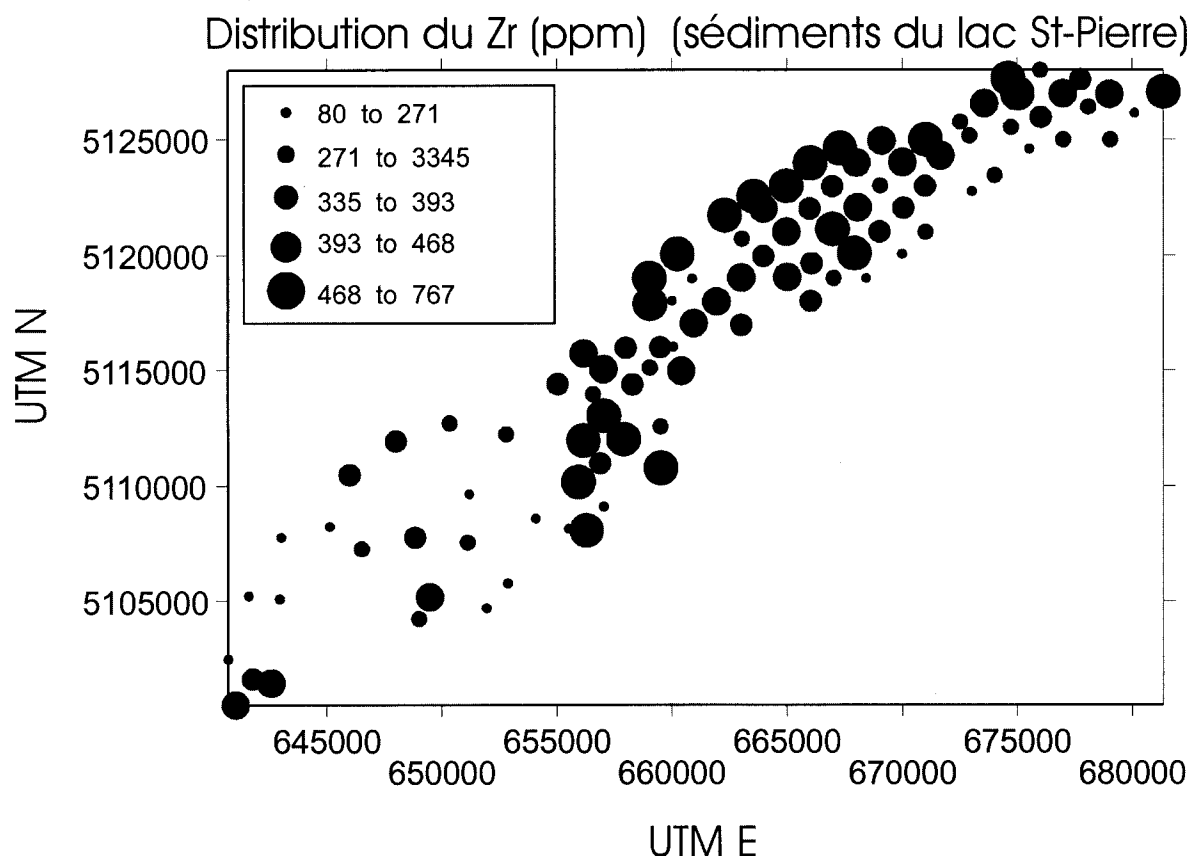


Figure 15. Distribution des abondances en Zr mesurées dans les sédiments du lac St-Pierre. Notez la forte diminution des abondances en Zr en se dirigeant vers les îles de Sorel (sud-ouest de la carte). Les coordonnées X et Y sont en UTM NAD27.

Afin de vérifier le comportement spécifique du Zr vis à vis de la susceptibilité magnétique et de la granulométrie des sédiments nous avons réalisé une analyse statistique multivariée. Les résultats de l'analyse en composante principale sont présentés à la figure 16. Sur cette figure la susceptibilité magnétique ne semble pas influencée par la prédominance de limon ou d'argiles mais la proportion de sable semble influencer cette mesure (variation de l'axe F2). De plus, le Zr et l'Hf deux éléments contenus dans les zircons (minéraux lourds) montrent une bonne corrélation avec les valeurs de susceptibilité magnétique. Il est à noter que le Zr et le Hf, tout comme la susceptibilité magnétique, ne corrént pas avec des indicateurs de contamination anthropiques comme le Pb (figures 16, 17). Ceci corrobore notre hypothèse de travail voulant que ces paramètres sont influencés par des processus sédimentologiques primaires.

Notez également la forte corrélation entre le Rb et la proportion d'argiles. Cette corrélation suggère que le Rb pourrait être utilisé pour normaliser les abondances des métaux toxiques pour compenser l'effet des variations granulométriques dans les sédiments de fond du lac St-Pierre.

Analyse en composante principale

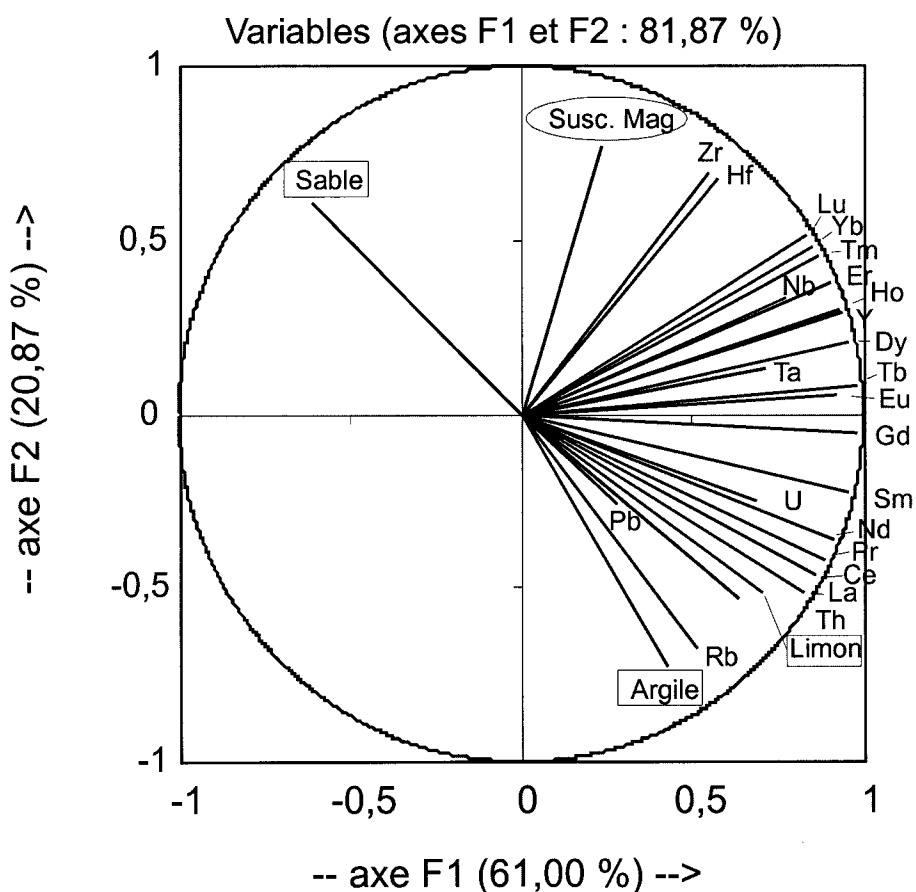


Figure 16. Analyse statistique multivariée présentant les résultats d'une analyse en composante principale (ACP) dans l'espace des variables. Notez la projection opposée des sables et argiles. La susceptibilité ne semble pas influencée par la prédominance de limon ou argiles mais la proportion de sable semble influencer cette mesure. Le Zr et l'Hf deux éléments contenus dans les zircons (minéraux lourds) montrent une bonne corrélation avec les valeurs de susceptibilité magnétique. Notez également la forte corrélation entre le Rb et la proportion d'argiles. Cette corrélation suggère que le Rb pourrait être utilisé pour normaliser les abondances des métaux toxiques pour compenser l'effet granulométrique.

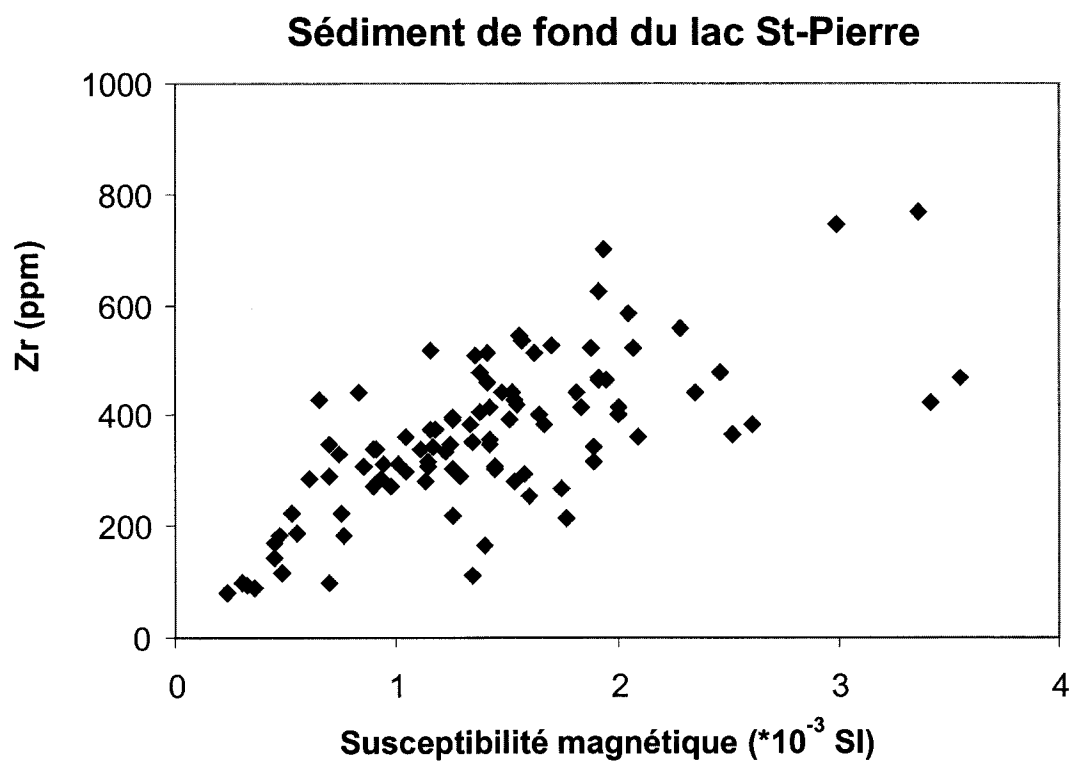


Figure 17. Corrélation entre le Zr (ppm) et la susceptibilité magnétique mesurée sur les échantillons de sédiment de fond du lac St-Pierre.

ANNEXE

Photo du levé d'induction électromagnétique sur le lac St-Pierre (mai 2004)



Levé d'induction électromagnétique EM-31 lors des essais sur le lac St-Pierre (crue printanière 2004).