

CHRISTINE BÉLANGER

Intégration 3D de données hydrogéophysiques pour la
caractérisation de l'aquifère entourant le site
d'enfouissement sanitaire de Saint-Lambert-de-Lauzon,
Québec

Mémoire présenté à
L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT
Québec

Dans le cadre du programme de
MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

Pour l'obtention du grade de
MAÎTRE ÈS SCIENCES (M.Sc.)

Erwan GLOAGUEN (directeur)
René LEFEBVRE (co-directeur et correcteur)
Bernard GIROUX (co-directeur)
Philippe PASQUIER (correcteur)
Mathieu J.DUCHESNE (correcteur)

RÉSUMÉ

La protection, la caractérisation et la restauration environnementale des aquifères requièrent la connaissance de la composition et des propriétés hydrologiques des milieux géologiques. Cependant, les informations provenant des données hydrogéologiques conventionnelles ne permettent pas de définir la continuité spatiale des propriétés hydrogéologiques à une résolution adéquate. Les méthodes géophysiques appliquées à l'hydrogéologie et à l'environnement permettent de fournir des informations quantitatives sur les propriétés hydrogéologiques, que ce soit la porosité ou la conductivité hydraulique. Le projet se concentre sur la compréhension d'un aquifère non confiné en terme de structure, de géométrie et de composition en intégrant en trois dimensions plusieurs données géophysiques et hydrogéologiques. Le site de l'étude se trouve aux alentours d'un ancien site d'enfouissement sanitaire situé à Saint-Lambert-de-Lauzon, au sud-ouest de la ville de Québec. En plus des données hydrogéologiques conventionnelles acquises sur des puits (essais de perméabilité, géochimie de l'eau, niveau de l'eau, etc.), trois méthodes géophysiques ont été utilisées : l'imagerie électrique 2D de surface, des levés de géoradar et des essais de pénétration au cône (CPTu). Dans le cadre de cette étude, l'intégration en 3D de toutes ces données permet une meilleure vision globale, facilite l'interprétation et guide le développement du modèle numérique d'écoulement et de transport de haute résolution. Le modèle hydrogéophysique 3D a aussi permis de relier des structures visibles dans plusieurs méthodes 2D pour en faire des surfaces hydrogéologiques 3D. Notamment, les données ont permis de contraindre l'estimation de la base de l'aquifère et ont rendu possible la caractérisation de zones contenant des composés organiques. Le modèle stratigraphique est désormais plus compréhensible et permet de contraindre la géologie du site plus aisément. Les profils d'imagerie électrique et les CPT sont cohérents, et ce, sur l'ensemble du site d'étude. Des structures ayant des résistivités semblables ont pu être distinguées ; améliorant la caractérisation hydrostratigraphique du site par l'analyse conjointe des CPT, des profils radars et des profils de tomographie électrique. De plus, l'imagerie électrique montre une diminution de la résistivité sous le site d'enfouissement uniquement. Ceci nous indique que soit le lixiviat est atténué naturellement juste à la sortie du site ou il coule vers la de l'aquifère et ne peut plus être détecté. L'approche intégrée donne accès à une meilleure compréhension de l'hétérogénéité spatiale à haute résolution en 3D.

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier mon directeur de maîtrise, Erwan Gloaguen, pour tout l'aide et le soutien qui m'a apporté durant les deux ans qu'a duré ma formation. Il m'a toujours soutenue et fait confiance. Il a été là pour moi autant au niveau scolaire que pour me faire cheminer dans la décision de mon choix de carrière. Erwan, je te dois beaucoup.

Je tiens à remercier aussi mes codirecteurs, René Lefebvre et Bernard Giroux. René pour son sens de l'humeur et sa dédramatisation et Bernard pour son sens pratique et son aide informatique. À tous les deux, merci pour vos corrections justes et franches.

Merci à Daniel Paradis et Laurie Tremblay qui ont toujours pris de leur temps pour répondre à mes nombreuses questions. Ils ont permis des échanges faciles et enrichissants. Merci à Martin Blouin de m'avoir initié à *Gocad*.

Finalement, je veux souligner la présence de ma famille qui est toujours derrière moi dans tout ce que j'entreprends. Merci pour le support moral et la correction de ce travail. Je suis une personne très chanceuse puisque je vous ai dans ma vie.

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	iii
1 Introduction	1
1.1 Contexte général	1
1.1.1 L'importance de la caractérisation et de la modélisation d'un aquifère	4
1.1.2 Survol des méthodes de caractérisation d'un aquifère	6
1.1.3 Objectifs du mémoire	16
1.2 Localisation et problématique du site d'étude	18
1.3 Travaux antérieurs	21
1.4 Méthodologie	30
2 Approche	32
2.1 Les techniques d'hydrogéologie	32
2.2 Utilisation de la géophysique	40
2.2.1 Le géoradar	40
2.2.2 L'imagerie électrique	51
2.2.3 Combinaison des techniques	59
3 Géologie et hydrogéologie du site d'étude	63
4 Construction d'un modèle hydrostratigraphique par l'intégration des données géophysiques multivariables	67
4.1 Création de surfaces	72
4.2 Définition électrique de l'hydrostratigraphie	74
5 Conclusion	90

Bibliographie	94
A Profils de géoradar	102
B Profils de tomographie électrique	122
C Détails des CPT	131

Liste des tableaux

4.1	Résistivités pour la zone 1 au nord et à l'est du site d'étude .	78
4.2	Résistivités pour la zone 2 à l'ouest du site d'étude	80
4.3	Résistivités pour la zone 3 sur le site d'enfouissement sanitaire	82
C.1	Information sur les CPT	132

Table des figures

1.1	Localisation du site d'étude. Le site d'enfouissement sanitaire est situé au centre de la zone d'étude.	19
2.1	Schématisation d'un essai <i>in situ</i> à niveaux multiples ([Paradis et al., 2008])	35
2.2	Localisation des CPT sur le site	38
2.3	Système <i>Geotech 605D</i> de l'INRS-ETE ([Tremblay et al., 2008])	39
2.4	Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu à faibles pertes électriques : la forme du signal reste constante et l'amplitude décroît de manière exponentielle (Adapté de [Annan, 2005])	41
2.5	Illustration du principe du géoradar.	44
2.6	Cette figure présente un profil de géoradar typique. Sur celui-ci, la ligne bleu indique la base de l'aquifère, les lignes rouges montrent la stratigraphie et les cercles indiquent les zones d'atténuation (Levé SL02) ([Tremblay et al., 2008])	46
2.7	Système radar ProEx avec antennes 200 MHz. L'unité principale d'acquisition est dans un sac sur le dos de l'opérateur. Un moniteur maintenu sur l'abdomen permet de contrôler les paramètres d'acquisition et de vérifier la qualité des données en temps réel.	47
2.8	Localisation des profils de géoradar (modifié [Tremblay et al., 2008])	49
2.9	Dispositif dipôle-dipôle	54
2.10	Construction de la pseudo-section	54
2.11	Localisation des profils d'imagerie électrique	57
2.12	Système SYSCAL Pro de l'INRS-ETE	59

2.13	A) Profil de résistivité électrique (<i>Champ</i>) effectué à proximité du site d'enfouissement. B) Profil de résistivité électrique (<i>P1ad</i>) effectué en amont du site d'enfouissement (au même endroit que le profil de géoradar de la figure 2.6). A1 : résistivité apparente mesurée; A2 : résistivité apparente calculée menant à A3; A3 : modèle de résistivité "vrai" inversée. B1 : résistivité apparente mesurée; B2 : résistivité apparente calculée menant à B3; B3 : modèle de résistivité "vrai" inversée.	61
2.14	En haut : résistivités apparentes mesurées; Au milieu : résistivités apparentes calculées; En bas : superposition du modèle électrique inversé, de l'image géoradar et des diagraphies électriques.	62
3.1	Paléoenvironnement du site d'étude ([Paradis et al., 2009]) . .	64
3.2	Coupe stratigraphique du site d'étude ([Paradis et al., 2009]) .	65
4.1	L'ensemble des profils de tomographie électrique et de radar dans <i>Gocad</i>	69
4.2	La continuité des structures est beaucoup plus facilement compréhensive en 3D	71
4.3	La surface de la base de l'aquifère a pu être déterminé à partir des CPT et des levés de radar	73
4.4	La surface d'une dépression conductrice de l'aquifère a pu être déterminé à partir des levés de radar	74
4.5	Les différentes zones décrivant des hydrofaciès aux propriétés électriques différentes	77
4.6	Exemple de profil pour la zone 1 : STL16. La figure du haut montre le profil et la figure du bas montre le même profil avec la surface de la base de l'aquifère.	79
4.7	Exemple de profil pour la zone 2 : Savane 345. La figure du haut montre le profil et la figure du bas montre le même profil avec la surface de la base de l'aquifère.	81
4.8	Ensemble des profils pour la zone 3. De gauche à droite : site 4, site 3, site 2, site 1 et P11. Le coin supérieur montre les mêmes profils avec la surface de la base de l'aquifère.	83
A.1	Profil SL02	102
A.2	Profil SL03	103

A.3	Profil SL04	103
A.4	Profil SL05	104
A.5	Profil SL06	104
A.6	Profil SL07	105
A.7	Profil SL07B	105
A.8	Profil SL09	106
A.9	Profil SL10A	106
A.10	Profil SL11	107
A.11	Profil SL12	107
A.12	Profil SL13	108
A.13	Profil SL14	108
A.14	Profil SL15	109
A.15	Profil SL16	109
A.16	Profil SL17	110
A.17	Profil SL18	110
A.18	Profil SL19	111
A.19	Profil SL19B	111
A.20	Profil SL20	112
A.21	Profil SL21	112
A.22	Profil SL22	113
A.23	Profil SL23	113
A.24	Profil SL24	114
A.25	Profil SL24B	114
A.26	Profil SL27	115
A.27	Profil SL28	115
A.28	Profil SL100	116
A.29	Profil SL101	116
A.30	Profil SL102	117
A.31	Profil SL103	117
A.32	Profil SL104	118
A.33	Profil SL105	118
A.34	Profil SL106	119
A.35	Profil SL107	119
A.36	Profil SL108	120
A.37	Profil SL109	120
A.38	Profil SL110	121
A.39	Profil SL111	121

B.1	Profil p1ad	122
B.2	Profil Site 1	123
B.3	Profil Site 2	123
B.4	Profil Site 3	124
B.5	Profil Site 4	124
B.6	Profil Champ	125
B.7	Profil P11	125
B.8	Profil P4	126
B.9	Profil P14	126
B.10	Profil PER	127
B.11	Profil CAB	127
B.12	Profil STL16	128
B.13	Profil Savane 12	128
B.14	Profil Savane 345	129
B.15	Profil P8	129
B.16	Profil P8-2	130

1 Introduction

1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

L'eau est un patrimoine vital et irremplaçable qu'il nous faut protéger. Malheureusement, les impacts des changements climatiques et de la contamination anthropique menacent les ressources mondiales et rendent leur gestion durable de plus en plus précaire. Au Canada, la contamination de l'eau souterraine à Walkerton, à Ville-Mercier et à Shannon démontre de façon dramatique que l'eau est un patrimoine fragile qu'il faut préserver. L'importance des enjeux liés à la qualité et à la connaissance de l'eau souterraine a mené le gouvernement du Québec à se doter d'une politique nationale de l'eau en 2002. Cette politique a mené au programme de caractérisation des eaux souterraines du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, mis en oeuvre par un groupe de chercheurs reconnus de sept universités québécoises [Ministère du Développement Durable, 2002]. À

l'échelle plus locale, plusieurs sites québécois ont été étudiés afin de prédire l'évolution des contaminants dans le temps et leur éventuel impact sur l'environnement, ainsi que leur possible interférence avec les zones de captage d'eau souterraine ou de surface ([Blouin et al., 2009]).

Le but de ces caractérisations hydrogéologiques est de construire des modèles numériques d'écoulement de l'eau souterraine et de transport des contaminants afin d'en appréhender la complexité, de pouvoir faire des prédictions sur leur évolution dans le temps en fonction des activités humaines ou des variations naturelles et de définir des stratégies de gestion optimales. Ces modèles numériques sont calés avec l'ensemble des mesures hydrogéologiques comme les charges hydrauliques, les précipitations, la recharge, les flux d'eau aux limites et les conductivités hydrauliques inférées à partir de tests hydrauliques *in situ* le long de quelques forages.

Au Québec, les caractérisations des systèmes aquifères, même en milieu académique, sont généralement effectuées à l'aide de ces méthodes conventionnelles, basées sur l'information provenant surtout des forages ([Lefebvre, 2010]). Cependant, l'expérience a montré la limite des méthodes conventionnelles pour caractériser la variabilité spatiale des aquifères, que ce soit à l'échelle régionale ou plus locale ([Rubin and Hubbard, 2005] et [Bélanger et al., 2009]). En effet, bien que les forages permettent de mesurer à haute résolution les variations verticales, il est admis que l'information provenant de ces forages ne permet pas de caractériser latéralement la variabilité spatiale des aquifères

à une échelle et une résolution adéquates. Par ailleurs, l'ajout de forages ne permet pas de caractériser à des coûts réalistes et à l'échelle de résolution spatiale nécessaire la variabilité spatiale des aquifères.

Les méthodes géophysiques appliquées à l'étude de l'eau souterraine (hydrogéophysique) se sont grandement développées au cours de la dernière décennie ([Butler, 2005] et [Rubin and Hubbard, 2005]). Cet essor s'explique en raison de leur succès à fournir des informations quantitatives à une résolution et une couverture spatiale permettant de définir ces propriétés. Ces données géophysiques sont acquises le long de forages (diagraphie) ou entre les forages (tomographie) ou à partir de la surface. Les méthodes en forages demeurent la catégorie de méthodes géophysiques les plus utilisées puisqu'elles mesurent les propriétés physiques à une échelle et une résolution pouvant être corrélées aux mesures hydrogéologiques en forages avec une distorsion des corrélations minime par rapport aux méthodes géophysiques de surface ([Rubin and Hubbard, 2005]). Les méthodes de diagraphie les plus étudiées sont les diagraphies de conductivité et de permittivité électriques ainsi que les mesures des propriétés mécaniques. Les tomographies entre forages les plus utilisées sont les tomographies de radar géologique et de conductivité électrique qui permettent des estimations de la permittivité et de la conductivité électriques, respectivement. Scientifiquement, le défi est de réussir à intégrer les mesures de tomographie et de diagraphie l'une à l'autre, d'intégrer aux modèles géophysiques les mesures géologiques et hydrogéologiques

et, finalement, de transformer les mesures géophysiques en paramètres hydrogéologiques ([Linde et al., 2006]). Les modèles ainsi obtenus devraient être validés par des logiciels de simulation d'écoulement, ainsi que par des mesures indépendantes, par exemple par des paramètres géochimiques.

1.1.1 L'importance de la caractérisation et de la modélisation d'un aquifère

La caractérisation des aquifères ainsi que la représentation des processus d'écoulement et de transport de masse par les simulateurs numériques représentent les seuls moyens permettant la compréhension quantitative de l'écoulement souterrain et de la migration des contaminants dans les milieux géologiques complexes. Sans cet exercice, la gestion à long terme et la réhabilitation des sites contaminés risquent d'être compromises, car il est très difficile d'intégrer et d'anticiper sur la seule base de l'expérience un ensemble de données hydrogéologiques complexe et volumineux. Par ailleurs, les modèles numériques permettent de modéliser l'hétérogénéité géologique et hydraulique des aquifères. C'est un avantage crucial lorsqu'on sait que la plus grande proportion des échecs de réhabilitation est reliée à une compréhension soit insuffisante ou erronée de l'hétérogénéité de l'aquifère ([De Marsily et al., 2005]). Hors, les systèmes aquifères présentent généralement une grande variabilité, et ce, à plusieurs échelles. En effet, leurs propriétés hydrauliques peuvent va-

rier de plusieurs ordres de grandeur sur de très courtes distances ([Lesmes and Friedman, 2005]). Ces variations façonnent le parcours, la diffusion et la dispersion de l'eau souterraine aussi bien que celui des contaminants. D'ailleurs, récemment, De Marsily déclarait qu'un des grands défis de l'hydrogéologie sera de réussir à représenter l'hétérogénéité des systèmes aquifères ([De Marsily et al., 2005]). Plusieurs travaux récents ont permis de développer des méthodes rendant possible une représentation de plus en plus détaillée du comportement complexe de l'eau souterraine grâce à l'avancement et au développement continu de la simulation numérique ([Ouillon et al., 2008]). Pourtant, ceux-ci, pour produire un modèle réaliste de l'hétérogénéité de l'environnement étudié, requièrent plus d'informations que les méthodes conventionnelles de caractérisation hydrogéologique peuvent en fournir. Des données indirectes provenant de mesures géophysiques peuvent compléter les mesures conventionnelles en palliant le manque de couverture spatiale en par les données continues plus nombreuses et moins coûteuses que les données conventionnelles ([Rubin and Hubbard, 2005] et [Ouillon et al., 2008]).

De plus, la rareté des mesures directes conventionnelles implique une autre limite importante dans l'application des modèles numériques d'écoulement et de transport de masse. En effet, le calage des paramètres hydrauliques des modèles passe habituellement par les charges hydrauliques. Pourtant, les charges observées peuvent autant être reproduites par des modèles numériques très différents. Donc, il existe un ensemble infini de modèles de propriétés hydrau-

liques équiprobables dû au manque de contraintes spatiales sur les charges hydrauliques et de mesures des paramètres hydrauliques. Ainsi, une grande incertitude demeure à l'égard de la représentativité du modèle et de la validité de ses prédictions, à plus forte raison pour les voies d'écoulement et de la vitesse de l'eau souterraine. Il est donc nécessaire de contraindre les modèles avec d'autres paramètres indépendants des charges hydrauliques quand ces modèles sont utilisés pour la réhabilitation des sites contaminés ou pour la conception de système de contrôle.

1.1.2 Survol des méthodes de caractérisation d'un aquifère

Une grande variété de techniques permet d'obtenir de l'information indirecte sur la structure spatiale et la distribution des paramètres hydrauliques des systèmes aquifères. Certaines sont utilisées depuis des décennies et d'autres viennent de faire leur apparition. Dans cette section, les principales méthodes qui permettent de caractériser un aquifère seront présentées ainsi que leurs limites.

Méthodes conventionnelles

La première classe d'approches est dite conventionnelle puisqu'elle est utilisée par la plupart des du secteur environnemental, qu'ils soient gouvernementaux ou privées. Il y a d'abord les essais de pompage qui sont les techniques les plus souvent utilisées pour connaître la transmissivité, le type d'aquifère, le coefficient d'emmagasinement et les limites d'un aquifère. Pour cette technique, il suffit de pomper l'eau à un débit constant connu (à un ou plusieurs paliers) tandis que le rabattement est mesuré dans le même puits ou dans d'autres à proximité du site de pompage où la distance est connue ([Chapuis, 1999]) ([Kruseman, 1990]). Cependant, cette technique est limitée à une échelle très large (écartement entre les forages) résultant en une réponse moyenne de la conductivité ([Butler Jr and Liu, 1993], [Meier et al., 1998] et [Sánchez-Vila et al., 1999]). Une hypothèse importante est que la zone à l'étude n'a pas de variations latérales. Il est donc difficile, avec ce procédé, d'obtenir un estimé de la variabilité de conductivité hydraulique (K) sur le domaine d'intérêt permettant la caractérisation du transport de contaminants, par exemple.

Ensuite, il existe les essais de perméabilité in situ qui permettent de déterminer la conductivité hydraulique, de confirmer le niveau piézométrique et de déterminer la compressibilité dans certains cas. Cette méthode se subdivise en deux catégories soit l'essai à niveau variable et l'essai à niveau constant.

Dans les deux cas, elle consiste à mesurer le rétablissement de la charge hydraulique après un choc hydraulique. La première catégorie s'effectue avec un changement brusque dans le niveau de l'eau du puits. La deuxième, quant à elle, provient plutôt du maintien du niveau de l'eau constant dans le tuyau d'injection et ce, pendant seulement quelques minutes, tout en mesurant le débit nécessaire pour le garder constant. Il est recommandé d'utiliser les essais à niveau variable puisqu'ils sont plus sûrs et fournissent plus d'informations ([Chapuis, 1999]). Pourtant, les valeurs de conductivité hydraulique obtenues ainsi sont influencées grandement par les propriétés du matériel à proximité du puits ([Beckie and Harvey, 2002]). Toutefois, cette approche peut bien représenter la variation verticale de K et sa variation latérale s'il y a un nombre suffisant de puits sur le site ([Yeh et al., 1995]). Une attention spéciale doit être portée sur le développement des puits puisqu'il influence directement l'estimation de la conductivité hydraulique ([Butler Jr et al., 1999] et [Butler Jr et al., 2002]).

L'analyse des échantillons de carottes recueillies lors des forages est une autre méthode pour caractériser les propriétés hydrauliques d'un type de formation. Cette technique se base sur des relations établies de l'analyse de la granulométrie des particules ou des méthodes du perméamètre pour obtenir une valeur de conductivité hydraulique. Les méthodes du perméamètre consistent à faire passer de l'eau à travers la carotte parallèlement son axe vertical avec un gradient hydraulique connu ([Butler Jr, 2005]). Toutefois,

il est très difficile de préserver les échantillons dans des sols non consolidés. Notamment, si les échantillons sont remaniés, ils perdent leur structure verticale qui influence beaucoup la conductivité hydraulique verticale. Cette lacune des méthodes conventionnelles s'ajoute au fait qu'elles sont généralement coûteuses en temps et en argent.

Méthodes géophysiques

Depuis une dizaine d'années, une nouvelle branche de la géophysique appliquée, appelée hydrogéophysique, se penche sur les possibilités d'utiliser et d'adapter des méthodes géophysiques appliquées à l'exploration minière ou pétrolière à la caractérisation hydrogéologique de la sous-surface. Les méthodes géophysiques fournissent une information de haute résolution sur les propriétés physiques d'un milieu. Ces propriétés physiques sont souvent caractéristiques d'un hydrofaciès. Les méthodes les plus communément utilisées en caractérisation environnementale sont la tomographie électrique de surface, les méthodes électromagnétiques, sismiques, gravimétriques et magnétiques ainsi que les techniques par enfoncement d'un pénétromètre (CPTu).

Dans le domaine des méthodes électriques, il y a d'abord la tomographie électrique en 2D qui permet de déterminer la résistivité du sol à partir de la mesure de la différence de potentiel entre plusieurs couples d'électrodes ([Rubin and Hubbard, 2005]). La résistivité électrique permet de déterminer

une stratigraphie grossière, de délimiter certains types de panache de contamination et de connaître la profondeur au roc. Elle peut aussi permettre de connaître, de façon relative, la teneur en eau ([J. Rings, 2009]). Certains désavantages sont par contre inhérents à son utilisation comme la longueur du profil qui peut devenir importante afin d'obtenir une bonne profondeur d'investigation. De plus, cette technique implique l'installation temporaire de plusieurs dizaines d'électrodes dans le sol. Cette technique n'est pas très coûteuse et est plutôt beaucoup utilisée en hydrogéologie.

Ensuite, il y a le géoradar (GPR) qui permet d'imager la sous-surface à l'aide des réflexions des ondes électromagnétiques aux fréquences radio (10 à 1000 MHz) ([Butler, 2005]). Les réflexions de l'onde électromagnétique aux interfaces entre des milieux géologiques sont reliées à leur différence de permittivité électrique. Ce paramètre peut donner une très bonne estimation de la stratigraphie du sous-sol, permettre de délimiter un panache de contamination, indiquer des cavités, des éléments enfouis et la position du niveau de l'eau et du roc. Une des limitations majeures de cette technique est qu'elle ne fonctionne pas dans un environnement très conducteur comme dans l'argile. La résolution de cette technique est remarquable et le coût d'acquisition des données est faible ([Delleur, 2007]). La tomographie électrique et le géoradar seront plus amplement discutées dans la section 2.2.

Il y a aussi les méthodes d'induction électromagnétique (EMI) qui mesurent la conductivité électrique du sol ([Delleur, 2007]). L'appareil de mesure est constitué d'une bobine de courant qui émet un champ électromagnétique primaire qui pénètre dans le sol et le champ magnétique vertical est mesuré dans une autre bobine. Lorsque le champ rencontre des zones plus conductrices, il y a induction de courants de Foucault dans le matériel qui, à son tour, génère un champ magnétique secondaire. La bobine réceptrice mesure la somme du champ primaire et secondaire dont le rapport en quadrature de phase est relié à la conductivité électrique du sol. Ainsi, le dispositif est plus sensible aux milieux conducteurs qu'aux milieux résistants. Le temps d'acquisition est habituellement court ([Butler, 2005]). Cependant, les méthodes d'interprétation nécessaires pour obtenir de l'information quantitative sont plus complexes que pour la tomographie électrique. Les applications optimales de cette technique sont dans ce cas de détection de cibles souterraines de haute conductivité comme l'interface entre de l'eau salée et de l'eau douce dans un aquifère ou des couches d'argile. Cette technique permet d'obtenir une stratigraphie grossière d'un site, de connaître la présence de certaines failles et de délimiter certains types de panache de contamination ([Delleur, 2007]). Pourtant, il est difficile avec cette méthode de repérer des cibles résistives. De plus, elle est très sensible aux bruits dus, par exemple, aux lignes électriques, aux barrières ou aux tuyaux de métal. Cette approche n'est pas trop coûteuse et est largement utilisée.

Les méthodes sismiques peuvent être utilisées pour caractériser des aquifères. Il faut d'abord savoir que ces méthodes sont beaucoup plus dispendieuses que les précédentes. Les ondes acoustiques utilisées par ces méthodes sont générées artificiellement et sont de basses fréquences (10 à 5000 Hz) ([Butler, 2005]). Ces signaux sont produits en un point source et se propagent dans la sous-surface en un front d'ondes. Lorsque ce front d'ondes se disperse, il se crée une déformation du milieu qui peut être enregistré par un géophone à la surface. Quatre types d'ondes sont créés lors de l'impulsion initiale, soit les ondes de compression (P), les ondes de cisaillement (S), les ondes de Rayleigh et les ondes de Love ([Delleur, 2007]). Les deux premières sont des ondes de corps qui pénètrent, alors que les deux dernières ondes sont des ondes de surface. Les ondes P et S sont celles les plus couramment utilisées ([Sheriff and Geldart, 1995]). Elles se propagent à des vitesses différentes qui sont directement reliées aux paramètres élastiques et à la densité du matériel. Les ondes de compression induisent un mouvement alternant de compression et de dilatations des particules. C'est la première onde qui arrive au géophone. L'onde P est la plus facile à détecter et souvent la seule information qui provient de celle-ci qui est traitée. Pour ce qui est des ondes de cisaillement, le déplacement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde et l'arrivée au géophone suit l'onde P puisque est plus faible que celle des ondes P. La première technique utilisée est la sismique réflexion qui se base sur le retour de l'onde P qui a été reflétée sur une interface où il y avait un contraste d'impédance acoustiques (pour une onde à

incidence verticale par rapport à l'interface, l'impédance est égale au produit de la densité et de la vitesse des ondes P). Cette méthode permet d'imager la stratigraphie d'un site à des résolutions variables. Pourtant, l'utilisation de cette technique peut être difficile dans les environnements non consolidés en raison du manque de contraste net de vitesse et en raison surtout du coût des appareils de mesure et de traitement.

Ensuite, la sismique réfraction utilise la propagation des ondes P le long des interfaces avant de retourner à la surface pour imager les milieux géologiques. À l'aide des mesures du temps de propagation des ondes réfractées et de la distance entre l'émetteur et le récepteur, il est possible de calculer l'épaisseur de différentes couches subhorizontales. De plus, la sismique réfraction permet d'estimer la vitesse de propagation des ondes à l'intérieur de chacune des couches traversées (si la vitesse croît avec la profondeur). Il est donc possible d'obtenir grâce à cette technique une stratigraphie grossière, les vitesses des couches, la profondeur du roc et de la nappe phréatique et structures géologiques ([Lankston, 1990]). Par contre, cette méthode donne des résultats de faible résolution. De plus, il est impossible d'obtenir de l'information si une couche de plus faible vitesse se retrouve sur une couche plus rapide.

Les méthodes gravimétriques mesurent les changements dans l'accélé-

ration gravitationnelle pour à obtenir de l'information sur la variation de densité de la subsurface ([Parriaux, 2009]). La résolution de cette méthode est plutôt faible expliquant pourquoi cette méthode n'est pas souvent utilisée pour la caractérisation détaillée d'un site. Néanmoins, elle peut être très pratique pour détecter des cibles comme l'interface entre les sédiments meubles et le roc ou l'emplacement de failles. L'appareil de mesure est le gravimètre relatif qui fonctionne sur le principe d'une masse suspendue à des ressorts (les appareils récents fonctionnent à l'aide de cristaux de quartz et du principe d'annulation de l'induction électrostatique, mais le principe reste le même) ([Xu, 2010]). Ces appareils mesurent la différence d'attraction terrestre en mesurant la différence d'allongement du ressort entre deux points. La différence dans l'allongement est attribuée au changement de gravité dû aux variations latérales de la sous-surface. Les corrections de bases appliquées aux données brutes, ainsi que l'analyse numérique des données transformées permettent d'obtenir la variation latérale de densité de la sous-surface. Cependant, il faut posséder des données d'élévations précises pour faire les bonnes corrections.

La dernière technique est la méthode magnétique qui mesure la direction, le gradient ou l'intensité du champ magnétique de la terre ([Telford et al., 1990]). L'intensité de ce champ à la surface de la Terre est fonction autant de la localisation du point d'observation dans le champ magnétique primaire de la

terre que de la quantité de matériel magnétique local et régional comme la magnétite. Le magnétomètre est utilisé pour mesurer l'intensité du champ magnétique verticale et le gradiomètre mesure le gradient vertical et horizontal du champ magnétique ([Parriaux, 2009]). Après une correction sur les effets du champ magnétique naturel de la terre, les données magnétiques peuvent être présentées sous la forme de carte de contour. Cette technique permet de déterminer la profondeur au roc et la présence de failles. Cette technique est toutefois très sensible pour des constructions industrielles ou tout autre objet qui peut causer de l'interférence.

Les méthodes par enfouissement incluant le pénétrromètre ou CPTu en anglais sont de plus en plus utilisées en caractérisation environnementale. Le principe consiste à enfouir à vitesse constante une sonde munie de capteurs dans le sol [Rubin and Hubbard, 2005]. Ces sondes mesurent la résistivité électrique, la teneur en eau, la pression des pores, la résistance en pointe et la friction. La résistivité est mesurée à l'aide de quatre électrodes en anneau séparées par une distance connue. Un courant quasi DC est injecté autour de la sonde par deux des anneaux et les deux autres mesurent la différence de potentiel induit. Comme la géométrie du dispositif est connue, la différence de potentiel est convertie en résistivité apparente. La teneur en eau est mesurée par deux électrodes en anneaux. Un champ électromagnétique de haute fréquence (100 MHz) est émis. La capacitance d'une paire d'électrodes est une fonction de la permittivité du sol, elle-même reliée à la teneur en eau,

et de la géométrie du système de mesures. L'ajustement de la fréquence de résonance de l'impédance d'un tel système permet d'estimer la capacitance du sol et donc d'en déterminer la teneur en eau ([Robinson et al., 2005] et [Wu et al., 2011]). La résistance en pointe est mesurée par un accéléromètre au bout de la sonde et la friction est mesurée à l'aide d'un manchon mobile.

Cependant, la conversion des paramètres physiques en paramètres hydrauliques ainsi que l'intégration et l'unification de l'échelle des différents types de données sont des exemples de difficultés auxquelles cette branche fait face.

1.1.3 Objectifs du mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans un important programme de caractérisation d'un aquifère avec une approche intégrée dans le but de déterminer la migration d'un panache de lixiviat ainsi que son atténuation dans le milieu naturel ([Tremblay et al., 2008],[Tremblay et al., 2009], [Paradis et al., 2008], [Paradis et al., 2009], [Paradis et al., 2010a] et [Paradis et al., 2010b]). Ceux-ci dépendent de plusieurs éléments tels que l'hétérogénéité physique et chimique, les conditions d'écoulement et des éléments chimiques présents dans le sol. L'approche intégrée utilise des méthodes novatrices pour fournir des informations plus détaillées à un coût moindre comparativement aux méthodes conventionnelles. L'intégration de méthodes indirectes (géophysique, géologique et géo-

chimique) ainsi que directes (sondage par enfouissement) est le principal objectif de cette caractérisation.

Ce projet met l'accent sur l'intégration de méthodes géophysiques pour définir la géométrie de l'aquifère et l'étendue du panache de lixiviat ainsi que la continuité des structures. Le but principal de ce projet est d'améliorer la compréhension de la structure de l'aquifère non confiné afin de mieux caractériser le panache de lixiviat en termes de géométrie, de structure et de composition. Pour ce faire, une nouvelle méthode de caractérisation environnementale a été établie dans le but de réduire les coûts tout en obtenant le maximum d'information de l'aquifère. Aussi, l'information géophysique recueillie devait servir à interpréter l'information collocalisée aux forages et la propager en 3D. L'amélioration de la représentation de l'hétérogénéité des dépôts meubles superficiels quaternaires devait être réalisée par l'intégration des mesures de diagraphie CPT (conductivité électrique et permittivité) de tomographie électrique de surface, de radar géologique et l'utilisation d'outils géostatistiques. Le logiciel *Gocad* ([Paradigm,]) a servi de plateforme 3D pour la construction du modèle hydrogéophysique dont la réalisation était un des buts du projet. Ce modèle permet de bien comprendre les limites de l'aquifère et de son comportement. Grâce à ce travail, il est possible de mieux comprendre le modèle stratigraphique et de le contraindre.

1.2 LOCALISATION ET PROBLÉMATIQUE DU SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude se trouve dans une région de 12 km^2 d'un sous-bassin versant qui est adjacent à un ancien site d'enfouissement sanitaire. Le site d'enfouissement se situe à St-Lambert-de-Lauzon soit à 35 km au sud-ouest de la ville de Québec (figure 1.1). L'endroit est facilement accessible par des routes primaires et le site d'étude est, quant à lui, accessible par des routes secondaires et par des chemins forestiers privés. L'accès principal du site sanitaire est le 517, rue St-Aimé à Saint-Lambert-de-Lauzon. Le site à l'étude est situé sur le bassin versant de la rivière Beaurivage. Il a été délimité par la ligne de partage des eaux entre le bassin versant de la rivière Beaurivage et la rivière Chaudière à l'est, de même qu'à partir de la physiologie hydrologique des ruisseaux avoisinants ([Tremblay et al., 2008]). La topographie de la région est relativement plate et les ruisseaux constituent les exutoires de l'eau souterraine. Cet aquifère est installé sur une unité de silt et d'argile disposée en lits successifs qui reposent sur une unité de till. La Régie intermunicipale de gestion des déchets des Chutes-de-la-Chaudière est le propriétaire du site d'enfouissement sanitaire et a participé au financement de cette étude. Le site d'enfouissement est situé sur le haut topographique de la région.

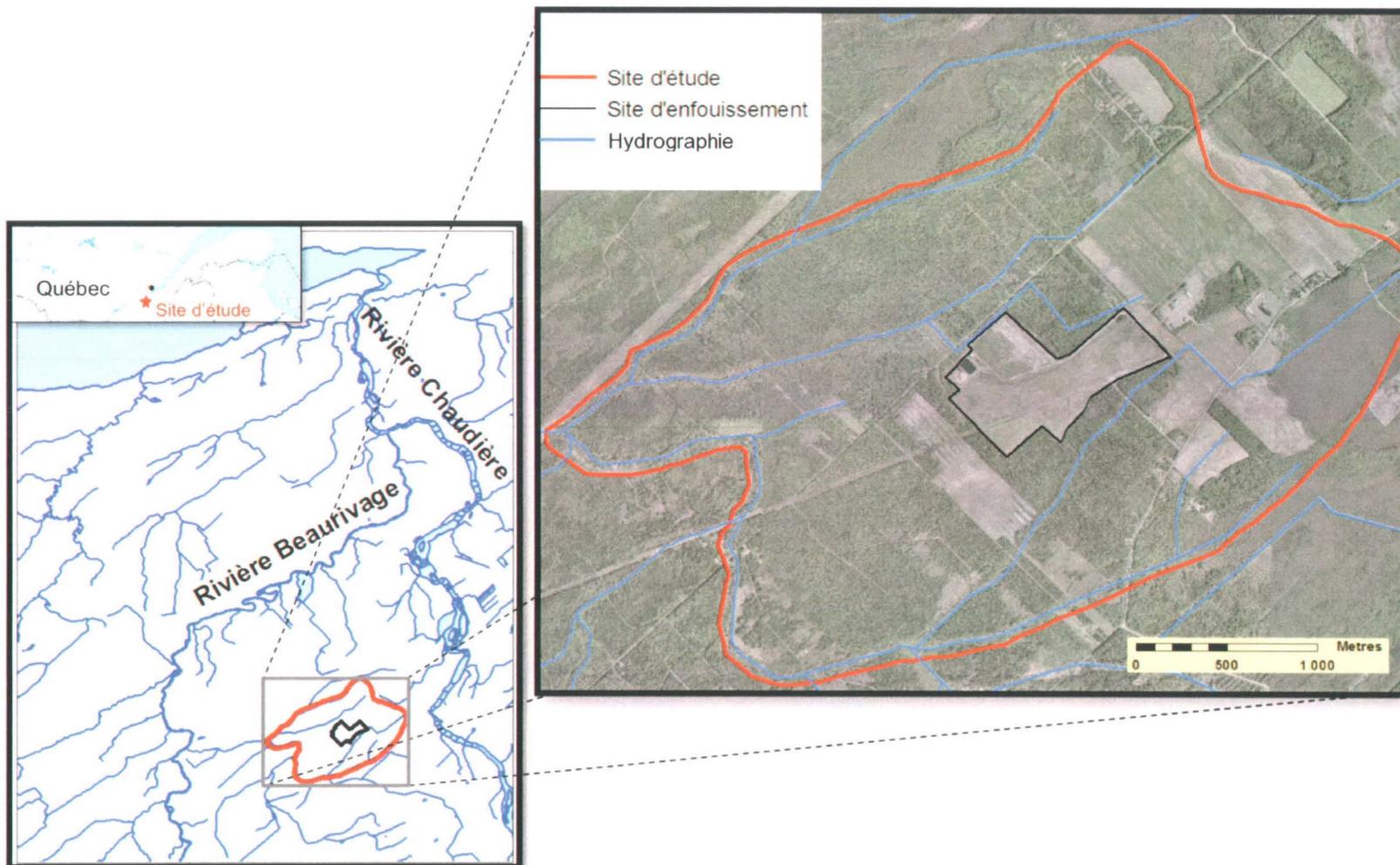


FIGURE 1.1 – Localisation du site d'étude. Le site d'enfouissement sanitaire est situé au centre de la zone d'étude.

Le site est exploité depuis 1974. Durant les années 1974 à 1997, 900 000 tonnes de déchets municipaux, agricoles et industriels y ont été enterrées. ([Régie intermunicipale de gestion des déchets de Chutes-de-la-Chaudière, 2009]). Les déchets étaient disposés directement sur l'aquifère sableux de 10 m d'épaisseur sans membrane protégeant l'eau souterraine. L'eau percole à travers les déchets en décomposition produisant du lixiviat. Celui-ci se mélange avec l'eau de l'aquifère et s'écoule dans la direction de l'écoulement de l'aquifère ([Fetter, 2001]). Depuis 1997, les anciennes cellules ont été recouvertes d'une couche d'argile et plusieurs autres cellules d'enfouissement ont été installées avec des membranes et un système de surveillance permettant de limiter les interactions entre les déchets et l'eau souterraine. Cependant, le lixiviat des anciennes cellules d'enfouissement a été détecté dans les ruisseaux avoisinants avant la fermeture de l'ancien site ([Géoroche, 1985]). Les contrastes de condition d'oxido-réduction entre le lixiviat réducteur, et l'aquifère oxydant imposent d'importantes transformations géochimiques. Il y a donc atténuation naturelle qui dépend de la composition chimique et minéralogique de l'aquifère et de la quantité et de la composition de la source du contaminant. Présentement, seule l'atténuation naturelle contrôle la migration du panache du lixiviat. Pourtant, l'efficacité de cette dernière n'a pas été démontrée. Ainsi, pour s'assurer d'une bonne gestion environnementale du site d'enfouissement, il faut mieux comprendre le processus d'atténuation et, donc, il faut l'étudier plus amplement. Plusieurs éléments jouent un rôle dans l'évaluation de l'atténuation naturelle et rendent l'étude complexe. En autres,

la dimension du site, son hétérogénéité physique et chimique, les conditions d'écoulement de la nappe phréatique et la variété de produits chimiques présents dans le sol sont de ces éléments qui influencent grandement le processus et qui doivent être étudiés pour comprendre le phénomène. L'intégration de plusieurs techniques dans des domaines différents est nécessaire pour caractériser les processus dans le temps et dans l'espace. Sur ce site, de nouvelles méthodes ont été développées et utilisées pour permettre de caractériser un aquifère et le panache de lixiviat qui s'y propage.

1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

De nombreux travaux ont été effectués sur le site et aux alentours, et ce, même bien avant l'implication de l'INRS. En effet, le premier rapport date de 1971 et a été réalisé par le gouvernement du Québec par le Ministère des Richesses naturelles ([Rochette, 1971]). Ce rapport avait pour but de localiser une source d'approvisionnement en eau pour la municipalité. Sept sondages y ont été réalisés qui ont mené à l'installation de deux puits filtrants.

Ensuite, viennent deux rapports de 1974 sur l'hydrogéologie du site du site d'enfouissement qui est maintenant au coeur de la problématique de ce mémoire. Les deux ont été réalisés par les Services de Protection de l'Environnement du gouvernement du Québec. Le premier rapport décrit la géologie

et l'hydrogéologie de ce qui est notre site d'étude actuel à partir d'ancien rapport effectué à Saint-Étienne à 2 milles au nord-est ([Plamondon, 1974]). Ils déduisent que le sable est assez perméable, mais que l'écoulement n'est pas très rapide. Le sens de l'écoulement n'a pas pu être déduit. Le site est entouré par trois côtés par des marécages qui ralentiraient l'écoulement de contaminants. Le dernier côté est en fait une rivière au sud-ouest. Selon eux, le site serait bien circonscrit. Les conclusions de cette étude sont que le site est adéquat pour devenir un dépotoir si, lors de l'enfouissement des déchets, un espace de sable est conservé entre la nappe phréatique et les déchets. Le deuxième rapport est pour savoir si le lot 258 possède les mêmes avantages que les lots 259 et 260 qui ont été déterminés propices à l'enfouissement sanitaire pour que la municipalité de Saint-Lambert-de-Lauzon puisse l'acquérir. L'étude se montre favorable ([Mailhot, 1974]).

En 1981, la première étude complète a été effectuée sur le site par Géomines Ltée qui sont des conseillers en études géologiques et minières engagés par le Ministère de l'Environnement ([Geomines, 1981]). Ce rapport est une étude hydrogéologique des environs immédiats du lieu d'enfouissement sanitaire. Les différents buts de l'étude étaient de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques du lieu (soit la perméabilité, la vitesse d'écoulement et la transmissivité), de préciser les courbes isopièzes et de déterminer les zones sensibles à la contamination due au dépotoir. Les sous-traitants Tek-eau Inc. ont réalisé une campagne de forages (sondages stratigraphiques, puits d'essais

et piézomètres), le laboratoire Chimitec s'est chargé de l'analyse des échantillons d'eau et le Ministère de l'Environnement a nivelé les différents points d'observations. En tout, il y a eu 74 m de forage, 21 points de nivellement, 7 essais de perméabilité, un essai de pompage de 8 hres 20 min avec observation de remontée et 15 échantillons d'eau analysés pour 19 paramètres différents. Ils ont calculé la perméabilité à l'aide de l'équation de Hvorslev et Castany et les résultats variaient de $3,8 \times 10^{-6}$ à $8,0 \times 10^{-5}$ m/s, ce qui représente un aquifère peu perméable de sable à grains fins à moyen et un sable de granulométrie plus fine à la base. L'essai de pompage en régime transitoire et stabilisé confirme les valeurs de perméabilité trouvée par les essais d'injection. Ensuite, ils ont trouvé une vitesse de migration de 64,9 m/a, ce qui correspond, selon eux, à une circulation dans le sol de deux ans. Ce temps était réglementaire à l'époque du rapport. Pourtant, l'augmentation saisonnière de la nappe phréatique réduirait sensiblement le temps de migration et contaminerait les ruisseaux de façon saisonnière. Une transmissivité de $6,86 \times 10^{-4}$ m²/sec a été trouvée. L'étude montre qu'il y a du lixiviat qui est observé dans les ruisseaux. L'eau de lixiviation montrait une extension latérale réduite. L'impact de cette eau serait faible sur l'environnement adjacent et l'atténuation du lixiviat par le sol serait suffisante pour répondre aux normes.

En 1985, c'est la compagnie Géoroche Ltée qui est engagée pour étudier le site pour le compte du Ministère de l'Environnement pour annexer des lots adjacents au site d'enfouissement sanitaire et agrandir ce dernier si les lots

répondent aux normes du Ministère de l'Environnement ([Géoroche, 1985]). Il y eu 5 sondages stratigraphiques, 5 piézomètres de 10 cm de diamètre, 11 essais de perméabilités in situ, 18 échantillons d'eau souterraine et de surface et 18 points d'observation du niveau de l'eau. Cette étude établit la stratigraphie des lots qui doivent être acquis, le niveau de l'eau qui varie de 0,5 m à 3,5 m de profondeur, la perméabilité moyenne du sable silteux de 1×10^{-5} m/s et les vitesses de migration de l'eau dans la direction des ruisseaux. Ceux-ci sont les points de résurgence de la nappe phréatique. En utilisant la vitesse maximum, la migration s'effectuerait de 2,5 à 3 ans, ce qui est conforme à la réglementation. Les conclusions quant à la qualité de l'eau au voisinage du site d'enfouissement étaient les mêmes que le rapport de 1981. Ainsi, il a été décidé que le site est conforme à la loi et que les risques de contamination des eaux souterraines et de surface sont faibles.

Une autre étude a été conduite en 1989 par CIMA sur la caractérisation des eaux de lixiviation et sur la formulation de recommandations pour le traitement des eaux ([CIMA, 1989]). C'est la firme Géohydrotek Inc. qui a été chargée de caractériser les eaux. Pour cette étude, 9 piézomètres ont été installés, 3 essais de percolation sur la couverture des déchets ont été réalisés, 4 essais de perméabilités in situ ont été accomplis et 13 échantillons d'eau ont été prélevés. La qualité de l'eau souterraine en amont du site a été déclarée comme potable et la qualité de l'eau en amont des ruisseaux ne semble pas affectée par la proximité du site. Une augmentation annuelle

de lixiviat dans un ruisseau a été remarquée depuis 1985. L'infiltration de l'eau de précipitation et l'écoulement souterrain en amont du site et d'un des ruisseaux entretenaient des gradients hydrauliques de l'ordre de 0,01, ce qui résulterait en temps de migration très court. Le taux de production de lixiviat sur l'ensemble du site serait environ de 1 l/s. Des mesures correctives ont été suggérées pour contrôler le taux de résurgence du lixiviat. La première suggestion fut le captage et le traitement des eaux de lixiviation. Pour se faire, une tranchée drainante placée entre le site et les ruisseaux pourrait être installée. Pourtant, des désavantages sont associés à cette pratique dont un taux de production inconstant de lixiviat, l'opération requise à long terme, des frais d'exploitation annuels et le risque de capter et traiter de l'eau de bonne qualité. La deuxième mesure est le contrôle de la production de lixiviat. Elle est possible par l'installation d'une coupure étanche jusqu'aux sols imperméables dans la partie amont et sur les côtés de façon à abaisser le gradient hydraulique. Il faut par contre implanter un recouvrement étanche en phase finale pour arrêter l'infiltration sinon la méthode serait inefficace. Les avantages de cette mesure sont son efficacité à long terme et très peu de frais d'exploitation. La dernière mesure est la combinaison des deux premières méthodes qui pourrait être appliquée si nécessaire. Ainsi, la deuxième méthode a été recommandée. Le Ministère de l'Environnement a décidé d'installer une membrane de polyéthylène dans la couche de recouvrement final des déchets afin de contrôler la production de lixiviat pour l'agrandissement du nouveau site. Aussi, le groupe-conseil Couture, Leclerc et associés inc. a fourni un

devis d'exploitation expliquant les normes à respecter dans l'agrandissement du site.

Le Groupe Conseil TS a ensuite effectué un relevé piézométrique et une campagne d'échantillonnage pour le compte de la municipalité de Bernières en 1992 ([Groupe Conseil TS, 1992]). Dans chaque forage, il y a eu prélèvement d'échantillons de sol et d'eau, développement de nids de puits d'observation (soit deux crépines dans chaque forage) et l'exécution d'une analyse granulométrique. Ce rapport a servi aux prochaines études.

Deux différentes études ont été réalisées en 1993. D'abord, la première étude est réalisée en mars ([Gauthier et Guillemette Consultants Inc. et al., 1993a]). Elle est assez complète et présente un bilan et des mesures d'intervention sur le site d'enfouissement sanitaire. Elle fut présentée au Comité intermunicipal d'enfouissement sanitaire des Chutes-de-la-Chaudière. Le document fut préparé par Gauthier et Guillemette Consultants Inc., Dessau Environnement ltée et Serrener Consultation Inc. Cette étude a pris place au moment où le site atteignait la saturation. Les études qui avaient été réalisées jusqu'à ce rapport ne permettaient pas la prise de décision quant à l'extension du lieu actuel et son exploitation à long terme puisqu'elles n'apportaient pas tout l'éclairage voulu. Cette étude veut répondre clairement aux interrogations qui persistent encore quant aux différents enjeux (environnementaux, économiques, sociaux, techniques et autres). Ce rapport couvre la géomorphologie, l'hydrologie, la qualité des eaux, l'exploitation du lieu d'enfouisse-

ment sanitaire, le bilan et la prévision des quantités éliminées, les mesures de correction, le prolongement de la vie utile, la description des aménagements et les mesures de suivi et de contrôle environnemental. Les conclusions de cette étude sont claires. En effet, le site d'enfouissement sanitaire ne respectait pas les exigences de la réglementation de l'époque pour ce qui est de la vitesse maximale de migration, les aménagements et les méthodes d'exploitation. Les principaux problèmes étaient reliés au fait que les dépôts de surface sont perméables, à l'absence d'un couvert étanche et à la nappe phréatique qui est près de la surface et qu'il n'y a aucune ségrégation des déchets. Des mesures de correction devaient donc être entreprises à court et moyen termes. De plus, la durée de vie résiduelle du site était supérieure à celle anticipée. Les conclusions du bilan environnemental aident à définir les concepts permettant d'atteindre différents objectifs : soit de minimiser les impacts environnementaux, d'offrir des garanties environnementales à la population indépendamment de la poursuite ou non de l'exploitation et de permettre l'amortissement des investissements avec la poursuite de l'exploitation. Ils ont donc proposé un scénario en 11 étapes pour répondre à ces objectifs qui comprennent, en autres, l'amélioration des aménagements, une étude environnementale sur les risques de contamination, le respect de différents lois et certificats dans les travaux actuels et futurs et bien d'autres. De plus, le rapport indique les actions à entreprendre. Finalement, beaucoup de recommandations sont faites au sujet de la constatation sur le site d'enfouissement, de la sécurité, du prolongement de la vie utile, des me-

sure de suivi et contrôle environnemental. Le rapport conclut en disant qu'il y a contamination sans qu'elle soit dangereuse pour l'eau potable, qu'il y a contamination par une autre source de polluant en amont du site et que l'atténuation naturelle semble contribuer d'une manière satisfaisante au contrôle du lixiviat sauf pour quelques endroits. Les responsables du rapport insistent sur la nécessité de rendre le dépotoir étanche, de capter et traiter le lixiviat et les biogaz. Une étude hydrogéologique et géochimique complémentaire réalisée par la même association de consultant a été accomplie en novembre ([Gauthier et Guillemette Consultants Inc. et al., 1993b]). Le but était de vérifier la faisabilité du concept d'étanchéisation et captage des eaux de lixiviation. Les travaux réalisés sont 10 forages dont 4 se rendent au roc, l'installation de 10 piézomètres, 9 essais de perméabilités à charge variable in situ, la prise d'échantillons de sol et de l'eau souterraine (11 dans les piézomètres, 5 dans les tranchées). De plus, des essais en laboratoire ont été réalisés dont 15 analyses granulométriques, 7 analyses sédimentométriques, 2 teneurs en eau et 2 essais de perméabilité sur des échantillons intacts provenant du dépôt d'argile. Ces tests ont permis de déterminer la stratigraphie, la composition du roc, une diminution de la permittivité en fonction de la profondeur, l'écoulement perpendiculaire à l'axe longitudinal du site (NO-SE), que l'aquifère est à nappe libre, que le dépôt meuble jouent un rôle d'atténuation naturelle et que le niveau imperméable est présent localement sous le dépotoir, que son épaisseur est nettement inférieure à la réglementation et ne présente pas une continuité parfaite.

Le dernier rapport réalisé par des consultants date de 1998 ([Consultants H.G.E. Inc, 1998]). C'est un rapport d'exécution de la mise en place de 6 piézomètres. Il a été réalisé par Consultant H.G.E. Inc.. Il consistait à fournir la description des matériaux, les caractéristiques organoleptiques, les détails d'installation, le niveau de l'eau souterraine, des rapports granulométriques, des résultats de pH et de la conductivité électrique.

Depuis ce temps, la Régie intermunicipale de gestion des déchets des Chutes-de-la-Chaudière a mandaté l'INRS-ETE de mener une caractérisation hydrogéologique. Ainsi, le site est devenu un site d'étude permettant l'expérimentation de nouvelles méthodes de caractérisation. Le programme de recherche comprend la réalisation de trois projets de 2e et 3e cycles, dont ce projet-ci. Présentement, sur le site, cinq méthodes de caractérisation ont été combinées : hydrogéologiques (méthodes par enfoncement avec CPT/SMR, essais hydrauliques), géophysiques (géoradar de surface, diagraphies et résistivité électrique) et géochimique (profils du fluide). Des outils géostatistiques ont permis l'intégration des données qui proviennent de différentes disciplines. En effet, la première phase des travaux intègre des données hydrogéologiques, géophysiques et géochimiques a été réalisée pour permettre une meilleure caractérisation de l'aquifère, de délimiter le panache de lixiviat et d'analyser l'atténuation du lixiviat.

Le projet de Ph.D. de Daniel Paradis combine les méthodes hydrauliques et CPTu/SMR dans le but de mieux représenter la distribution spatiale hété-

rogène des hydrofaciès et de leurs propriétés hydrauliques afin d'améliorer la compréhension de l'écoulement de l'eau souterraine et le transport de contaminants dans les aquifères.

Le projet de doctorat de Laurie Tremblay porte sur la caractérisation géochimique et son interprétation dans le but d'utiliser les traceurs géochimiques pour valider un modèle numérique de transport de masse représentant les mécanismes d'atténuation naturelle du lixiviat émis par l'ancien site d'enfouissement de Saint-Lambert-de-Lauzon ([Tremblay et al., 2008]).

1.4 MÉTHODOLOGIE

Ce projet se positionne dans une nouvelle façon d'aborder l'hydrogéologie. L'outil privilégié sera l'utilisation et l'intégration de plusieurs méthodes géophysiques. La géophysique est un outil peu coûteux qui permet d'investiguer l'hétérogénéité de la subsurface sur d'importantes superficies tout en minimisant l'installation de puits. La géophysique permet d'une part de déterminer rapidement les emplacements où il y a des anomalies. Les levés de géoradar ont d'abord été effectués puisqu'ils sont très rapides et permettent de déterminer les zones d'atténuation dans le sol qui peuvent correspondre au panache de lixiviat. Ensuite, les levés de tomographie électrique sont exécutés pour déterminer la résistivité du sol et ainsi savoir si l'atténuation dans les

lignes radars correspond bien à un changement à l'intérieur du milieu. Ainsi, les levés géophysiques ont été réalisés préalablement aux méthodes d'hydrogéologie classique, ce qui permet de déterminer le meilleur emplacement pour implanter les essais de pénétration au cône et les puits qui sont plus coûteux que les levés géophysiques. De cette façon, il était possible de récupérer le maximum d'information puisque ces derniers étaient installés directement où il y avait du changement dans les données géophysiques donc des changements dans le milieu. Ainsi, il a fallu entièrement traiter les résultats géophysiques obtenus sur le site. Les mesures de diagraphie CPT, de tomographie et de radar géologique ont été intégrées dans *Gocad* afin de construire un modèle hydrogéophysique. À ce stade, il a été possible de mettre toutes les mesures à la même échelle. Ensuite, une interprétation de la géophysique détaillée du site a été exécutée, ce qui a fourni aussi des mesures indispensables à la compréhension hydrogéologique. Ces mesures ont renseigné grandement les hydrogéologues sur l'hétérogénéité du site à l'étude. Ainsi, l'influence de ces dépôts sur les conditions hydrogéologiques dans les aquifères granulaires ainsi que dans les aquifères rocheux sous-jacents a pu être mieux comprise. De même, cette analyse permet de contraindre et d'améliorer le modèle hydrogéologique et géologique de l'ancien site d'enfouissement de Saint-Lambert de Lauzon et les contraindra en utilisant des méthodes de simulations géostatistique.

2 Approche

2.1 LES TECHNIQUES D'HYDROGÉOLOGIE

Puits d'observations

Les puits ont été installés à l'aide de la foreuse de l'INRS soit une foreuse *Geotech 605D* au même endroit i.e. dans le même trou que les sondages CPTu/SMR. Un tubage en métal de 76 mm de diamètre est poussé dans le sol à la profondeur voulue. Ensuite, un tube de PVC crépiné de 52 mm de diamètre intérieur (soit 60 mm de diamètre externe) est inséré dans le tube de métal avant que ce tubage ne soit retiré. Les ouvertures des crépines de PVC sont de 0,024 mm de largeur pour correspondre avec la distribution moyenne de la grosseur des particules des sédiments. Avec ce type de méthode, les sédiments sont en contact direct avec la crépine donc l'impact sur l'aquifère est minimal et le contact hydraulique est maximal ([Paradis et al., 2008]). Il est

important de développer les puits complètement pour obtenir de l'information fiable sur les propriétés hydrauliques ([Butler, 1998]). Un puits qui serait mal développé pourrait sous-estimer la conductivité hydraulique en raison de la présence des sédiments fins. Un effort substantiel a été fait pour développer les puits sur de nombreux intervalles. Un puits était considéré comme bien développé quand la conductivité hydraulique globale n'était plus affectée par les opérations de développement ([Paradis et al., 2008]). Sur le site, il y a environ 26 puits d'observation. Leur emplacement a été choisi en fonction des levés géophysiques. L'approche utilisée pour localiser les puits sera présentée à la section 2.2.3.

L'essai de perméabilité in situ multi-niveau

L'essai de perméabilité in situ est un essai couramment utilisé en hydrogéologie afin de déterminer la conductivité hydraulique le long d'un puits ([Butler, 1998]). Contrairement à l'essai de pompage classique, ce test fournit un estimé beaucoup plus local, comme son nom l'indique, de la conductivité hydraulique d'un aquifère. Toutefois, les essais traditionnels ne donnent qu'une seule valeur moyenne de conductivité hydraulique pour la portion crépinée d'un puits ce qui ne permet pas d'observer les variations verticales de ce paramètre. Or, la compréhension de l'écoulement et surtout du transport nécessite la connaissance de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique. C'est dans le but de pallier à ce problème que l'essai de per-

méabilité in situ à niveaux multiples a été conçu. Ce dernier s'opère exactement comme l'essai standard (à niveau variable) mais à plusieurs niveaux de l'aquifère, pour ainsi construire un profil vertical de conductivité hydraulique ([Melville et al., 1991], [Sellwood et al., 2005], [Zemansky and McElwee, 2005] et ([Ross and McElwee, 2007])). Même si cet essai nécessite beaucoup de temps à réaliser, la simplicité de son exécution le rend plus intéressant que d'autres essais tels que l'essai de traceur ou de pompage. Le principe hydraulique d'un essai in situ classique et d'un essai à niveaux multiples est exactement le même. Celui-ci consiste à imposer de façon quasi instantanée une variation dans la charge hydraulique dans le puits et à mesurer le temps nécessaire pour que la charge initiale se rétablisse. Lors d'un essai à niveaux multiples, cette procédure est effectuée à différents niveaux le long du puits, ceux-ci sont maintenus isolés du reste de l'aquifère par des obturateurs qui sont comme des coussins gonflables ("packers" en anglais). Un exemple schématique d'un essai in situ à niveaux multiples (MLST) est présenté à la figure 2.1.

Comme le montre la figure 2.1, l'essai in situ aussi bien que celui à niveaux variables nécessitent l'installation d'un puits crépiné tout le long de la zone de l'aquifère à caractériser. Bien sûr, dans le cas d'un site contaminé, il est primordial de s'assurer à ne pas propager une contamination de surface en profondeur en s'assurant de ne pas créer de courts-circuits hydrauliques le long des puits. Pour chacun des niveaux, une courbe du temps en fonction du logarithme naturel de la différence de charge est tracée. Théoriquement,

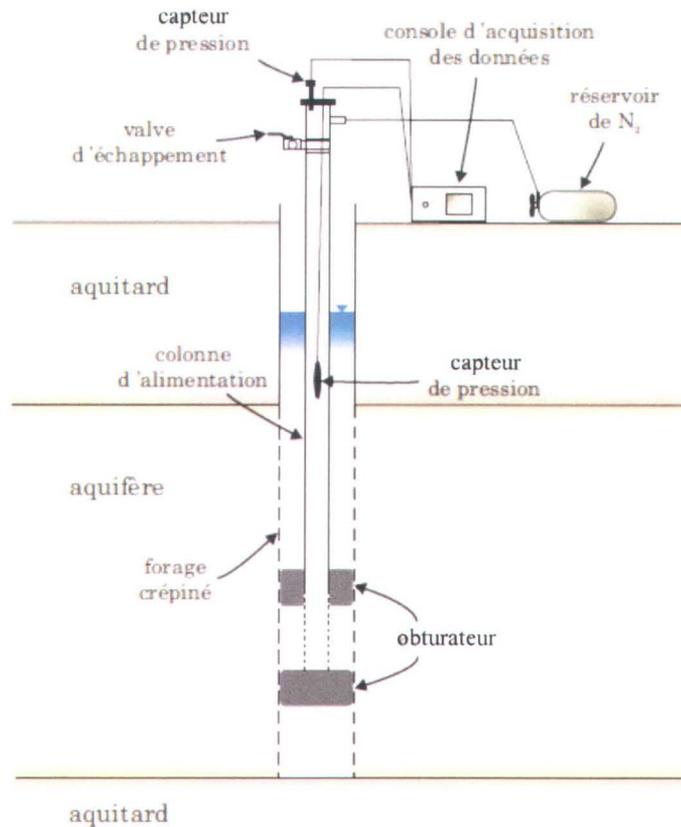


FIGURE 2.1 – Schématisation d'un essai *in situ* à niveaux multiples ([Paradis et al., 2008])

une droite est obtenue dont la pente est proportionnelle à la conductivité hydraulique recherchée. La constante de proportionnalité, dans ce cas appelée « coefficient de forme », est ensuite calculée selon les dimensions du puits ([Hvorslev, 1951]), ce qui permet ensuite de déduire la conductivité hydraulique. La norme canadienne pour de tels essais mentionne que le niveau piézométrique local doit aussi être mesuré pour chacun des niveaux. D'autres méthodes d'interprétation des résultats peuvent être utilisées se-

lon le comportement de la remontée du niveau d'eau en fonction du temps ([Butler, 1998]).

Piézocône multi-capteurs (CPTu/ SMR)

Les mesures par enfoncement avec un piézocône (CPT) permettent de mesurer par le truchement de l'enfoncement d'une sonde munie de capteurs des propriétés mécaniques et électriques des matériaux dans le voisinage proche de la sonde avec une résolution verticale centimétrique. Un cône de pénétromètre d'angle de 60° et de 15 cm^2 muni d'une sonde est enfoncé dans le sol à vitesse constante de 2 cm/s jusqu'à ce qu'il rencontre une unité compacte ou le roc selon les standards ASTM D3441 ([American Society for Testing and Materials, 2000]). À l'intérieur de la sonde, deux capteurs de pression mesurent indépendamment la résistance en pointe qui agit contre la pointe conique et la friction sur la tige. D'autres instruments sont installés sur la tige proche du cône comme un indicateur de pression de fluide. La pression à l'intérieur des pores peut être un indicatif de la présence de matériaux perméables ou peu perméables. Sur le modèle de sonde utilisée (CPTu/ SMR), il y a aussi quatre anneaux d'électrodes placés directement au-dessus des capteurs mécaniques ([Shinn II et al., 1998]). Les deux anneaux intérieurs permettent de déterminer la permittivité du sol en utilisant une fréquence de 100 MHz . La résistivité est mesurée à partir des anneaux extérieurs distancés de 9 cm . La fréquence utilisée est de 100 MHz pour éviter la polarisation du sol.

([Paradis et al., 2008]). Avec cette méthode, il est donc possible de déterminer la résistivité globale, la permittivité, la friction du matériel, la pression interstitielle, l'inclinaison et la résistance en pointe. Ces mesures sont prises tous les 2-3 cm, ce qui donne un profil stratigraphique et mécanique complet le long du forage investigué. Dans le cadre de ce projet spécifique, les paramètres de la résistivité globale, la permittivité, la friction du matériel, la pression interstitielle, et la résistance en pointe ont été considérés. Aussi, grâce aux mesures CPT il est possible d'estimer le type de sol que rencontre la sonde à l'aide de chartes empiriques ([Robertson and Campanella, 1983] et [Fellenius and Eslami, 2000]).

Les méthodes par enfoncement permettent aussi de diminuer le coût d'installation de forages permanents ([Butler Jr, 2005]), rendant rentables les méthodes de tomographies entre forages qui donnent accès aux mêmes propriétés physiques, mais entre les forages et avec une résolution décimétrique. Cette haute résolution permet aux relations statistiques entre les propriétés physiques et hydrogéologiques in situ d'être préservées. Ces données physiques le long et entre des forages fournissent une information indirecte, dense, continue et à faible coût de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique, K ([Rubin and Hubbard, 2005]). L'ajout de valeurs indirectes de K , obtenues à faible coût par relations pétrophysiques, permettra d'augmenter l'information quant à la distribution des propriétés hydrogéologiques d'intérêt.

Sur le site, 77 CPTu ont été effectués sur le site de Saint-Lambert (fi-

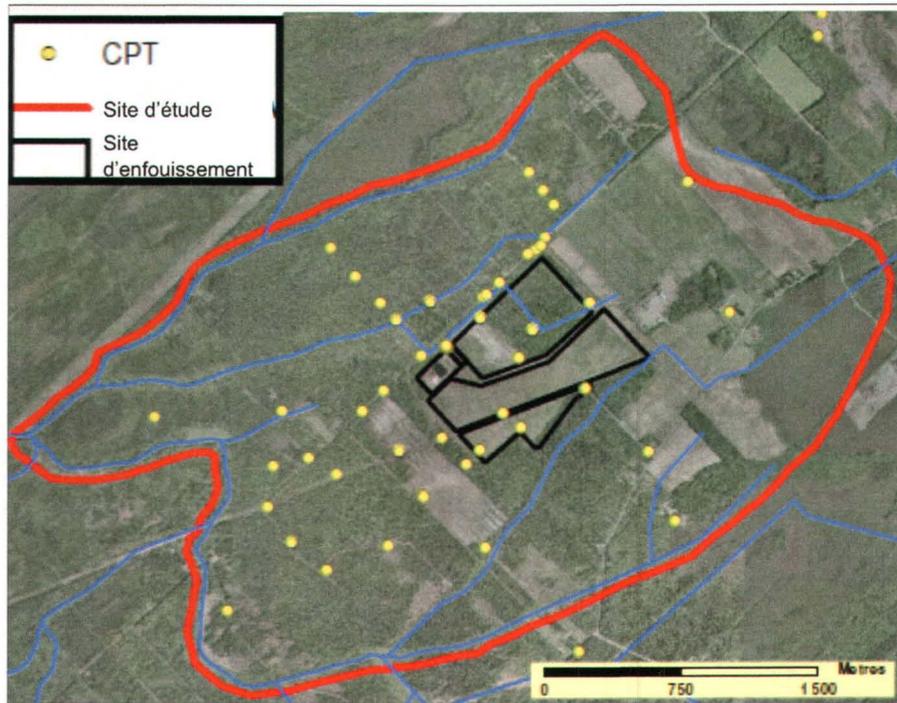


FIGURE 2.2 – Localisation des CPT sur le site

gure 2.2). Pourtant, il n'est pas aisé de déterminer l'endroit qui sera le plus pertinent pour l'installation des puits et des CPT. En effet, avec une connaissance restreinte de ce qui se déroule dans le sous-sol, l'emplacement choisi est souvent aléatoire ou décidé arbitrairement sur une grille plus ou moins régulière. De plus, ces techniques sont plutôt dispendieuses comparativement à des techniques non intrusives. Il est donc approprié d'avoir une idée de ce qui se passe dans le sol de façon non intrusive avant les forages, ce que permet la géophysique.



FIGURE 2.3 – Système *Geotech 605D* de l'INRS-ETE ([Tremblay et al., 2008])

2.2 UTILISATION DE LA GÉOPHYSIQUE

2.2.1 Le géoradar

Principe général du géoradar

Le géoradar est une méthode géophysique qui permet de cartographier l'interface entre des structures souterraines présentant un contraste de permittivité diélectrique en utilisant des ondes électromagnétiques de fréquences radio ([Daniels, 2005]). Les fondements de cette méthode géophysique sont issus de la théorie de l'électromagnétisme développée il y a deux siècles par Maxwell. La propagation des ondes EM dans un milieu peut être décrite par la combinaison des équations de Maxwell, décrivant mathématiquement le lien unissant les paramètres électriques et magnétiques, et des équations constitutives, décrivant le comportement des matériaux face à un champ électromagnétique. Brièvement, les propriétés clés définissant le déplacement des ondes EM sont la vitesse de phase ν , l'atténuation α et l'impédance électromagnétique Z . Aux basses fréquences, le champ électromagnétique se diffuse dans le matériau en fonction de celles-ci. Ce sont les fréquences utilisées par les méthodes d'induction EM. Par contre, aux hautes fréquences, c'est-à-dire aux fréquences couvertes par le géoradar (10 à 1000 MHz), le champ électromagnétique se propage davantage comme une onde à travers le matériau et, pour ϵ , μ et σ constants, la vitesse et l'atténuation deviennent indépendantes

de la fréquence. À ces fréquences, dans un milieu homogène à faibles pertes, la propagation des ondes radars se fait avec conservation de la phase et avec une atténuation des amplitudes de type exponentiel décroissante, comme le montre la figure 2.4 ([Annan, 2005]).

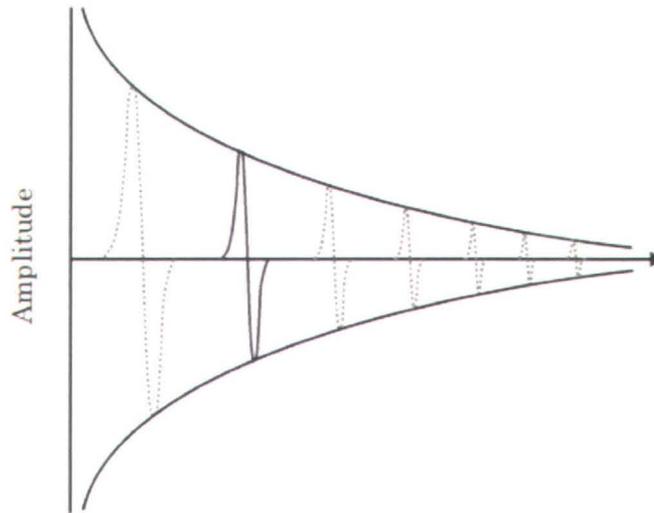


FIGURE 2.4 – Propagation d’une onde électromagnétique dans un milieu à faibles pertes électriques : la forme du signal reste constante et l’amplitude décroît de manière exponentielle (Adapté de [Annan, 2005])

Il y a trois paramètres physiques qui contrôlent la propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu, soit : la perméabilité magnétique μ (capacité d’un milieu à générer un flux magnétique sous l’influence d’un champ magnétique), la permittivité diélectrique ϵ (elle représente la redistribution locale des charges liées par unité de surface sous l’action d’un champ électrique) et la conductivité électrique σ (disponibilité et mobilité des charges) ([Gloaguen, 2004]). Quant à la perméabilité magnétique, puisque

l'eau et la majorité des minéraux formant les sols sont non ferromagnétiques, leur perméabilité magnétique est considérée comme étant égale à celle du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Ainsi, dans un milieu non dispersif, de perméabilité μ_0 et où la conductivité électrique est faible, la vitesse v et l'atténuation α des ondes EM s'expriment par les équations suivantes :

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\epsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^2} - \epsilon_r \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\epsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^2} + \epsilon_r \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

où c est la vitesse de la lumière en m/s. La relation entre la vitesse v de propagation de l'onde et sa phase β est donnée par la formule (2.3).

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.3)$$

C'est la conductivité électrique qui est principalement responsable de l'atténuation des ondes EM. Dans un milieu composé essentiellement de sable et de gravier, la conductivité électrique est majoritairement due aux ions en solution dans l'eau interstitielle : ainsi, plus l'eau est conductrice, plus le

milieu est atténuant. De plus, la présence de silt ou d'argile provoque une augmentation considérable de la surface spécifique des grains, accentuant substantiellement l'effet de la conduction de surface (phénomène de la double couche). Un tel milieu devient donc très atténuant et limite grandement la profondeur d'investigation du géoradar.

Le principe du fonctionnement se base donc sur cette théorie. Ainsi, une impulsion électromagnétique de haute fréquence est émise par une antenne. Le type d'antenne émettrice la plus couramment utilisée est l'antenne impulsionnelle où un signal à large bande et de courte durée est créé en appliquant un courant aux bornes de l'antenne émettrice ([Gloaguen, 2004]). Il existe un autre type d'antenne, dite à ondes synthétiques, mais celui-ci ne sera pas abordé ici. La fréquence centrale d'émission des antennes utilisées est de 100 MHz. L'impulsion induit une onde électromagnétique EM qui se propage dans le sol. Lorsque cette onde parvient à une structure présentant un contraste de propriété diélectrique, une partie de l'énergie de l'onde est réfléchie ou réfractée. L'énergie réfléchie et réfractée est éventuellement captée à une antenne réceptrice. Une unité d'acquisition enregistre les mesures nommées traces à tous les mêmes intervalles de distance. Pour chacune des paires de positions émetteur-récepteur, le temps de parcours de l'onde directe ainsi que son amplitude sont enregistrés en fonction du temps ([Gloaguen, 2004]). La juxtaposition de ces traces permet d'imager le sous-sol.

De cette mesure, on peut extraire le temps de parcours de même que

l'amplitude des ondes transmises, réfractées ou réfléchies entre un émetteur et un récepteur. Selon le mode d'acquisition des données, le géoradar permet de retrouver soit l'emplacement des principales structures géologiques ou autres (niveau de la nappe souterraine, stratifications, canalisations...), soit les champs de vitesse et d'atténuation (tomographie entre forages). Dans un milieu poreux comme des sables, la variation de la teneur en eau est le facteur principal déterminant des contrastes. Ainsi, une variation de la porosité et/ou de la saturation en eau dans le milieu générera une réponse mesurable avec le géoradar si (1) le contraste est suffisamment élevé pour générer un signal plus énergétique que le bruit ambiant, et (2), si ce contraste se situe à une profondeur incluse à l'intérieur des limites de détectabilité de la méthode.

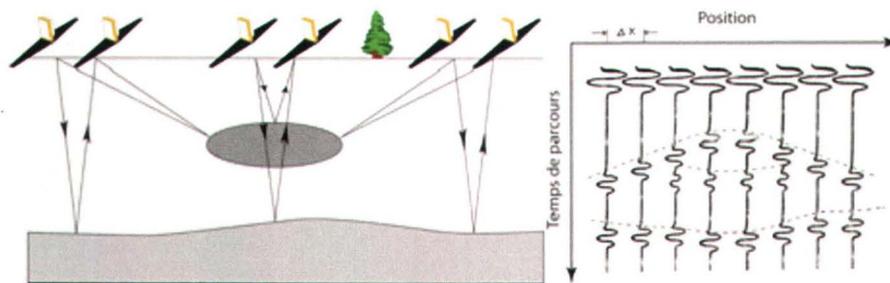


FIGURE 2.5 – Illustration du principe du géoradar.

L'onde EM est atténuée dans le sol et sa profondeur de pénétration est finie. La fréquence de l'onde et la conductivité électrique du milieu dictent la profondeur de pénétration de l'onde. La fréquence influence également la résolution de la technique, c'est-à-dire la capacité à imager des objets ou structures de petites dimensions. Plus la fréquence est élevée, meilleure est la

résolution, mais plus faible est la pénétration. Les équipements peuvent être utilisés avec des antennes de différentes fréquences et il s'agit de déterminer quelles antennes offrent le meilleur compromis entre pénétration et résolution.

Dans un contexte environnemental, le géoradar fournit des informations primordiales pour contraindre un modèle hydrogéologique. En effet, il renseigne d'abord sur la stratigraphie présente dans le sol (figure 2.6), ce qui peut aussi permettre de déterminer le mode de déposition des sédiments quaternaires. Part le fait même, il peut aussi indiquer la topographie de la base de l'aquifère si celle-ci est visible dans l'intervalle d'investigation possible avec l'équipement. Finalement, les profils de géoradar peuvent montrer des zones d'atténuation. Le lixiviat étant globalement plus conducteur que l'eau de l'aquifère non contaminé qui contient moins d'ions, il pourrait être repréré sur les profil par des zones d'atténuation. Pourtant, l'analyse seule des profils de géoradar ne peut pas suffire à l'affirmation de cette conclusion puisque l'atténuation pourrait aussi être causée par une couche très conductrice à plus faible profondeur ou à une quantité moindre d'énergie due à la présence d'un fort réflecteur à plus faible profondeur.

Données et traitement des profils de géoradar

La figure 2.7 montre un des systèmes radar utilisé par l'INRS. Cet appareil est le RAMAC de la compagnie malageoscience. L'autre système utilisé est

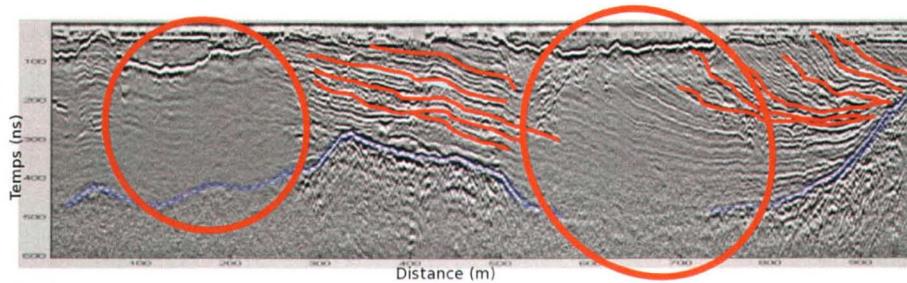


FIGURE 2.6 – Cette figure présente un profil de géoradar typique. Sur celui-ci, la ligne bleue indique la base de l’aquifère, les lignes rouges montrent la stratigraphie et les cercles indiquent les zones d’atténuation (Levé SL02) ([Tremblay et al., 2008])

un pulseEkko 1000 de la compagnie Sensors & Softwares. Cette photo montre des antennes montées sur des patins en bois. Les patins sont tractés par un deuxième opérateur tandis que le système acquiert les données en continu. La vitesse d’acquisition est relativement lente pour permettre un échantillonnage adéquat. Cette vitesse est de l’ordre de 50 minutes par kilomètre linéaire. Le positionnement est fait automatiquement grâce à un GPS relié à la console.



FIGURE 2.7 – Système radar ProEx avec antennes 200 MHz. L'unité principale d'acquisition est dans un sac sur le dos de l'opérateur. Un moniteur maintenu sur l'abdomen permet de contrôler les paramètres d'acquisition et de vérifier la qualité des données en temps réel.

Sur le site d'étude de Saint-Lambert de Lauzon, environ 25 km de levés de géoradar ont été effectués. L'ensemble des profils est montré en jaune à la figure 2.8. L'antenne de 100Mhz a été utilisée parce qu'elle offrait le meilleur rapport entre la profondeur d'investigation et la résolution. Le traitement effectué sur chaque profil consiste d'abord par l'application du filtre De Wow. Celui-ci permet d'enlever les basses fréquences du signal. Ensuite, une correction statique est effectuée qui permet de rajuster le temps de la première arrivée au temps zéro. Un gain manuel est ensuite appliqué sur chaque profil. En effet, dans sa forme d'origine, un profil de géoradar montre seulement les premiers réflecteurs puisque la plus grande partie de l'énergie est réflé-

chie sur ces premiers réflecteurs. Ainsi, beaucoup moins d'énergie pénètre en profondeur (voir figure 2.6). Pour améliorer la visibilité des réflecteurs en profondeur, il faut donc augmenter la force de leur signal. Le gain a été adapté pour chacun des profils pour obtenir la meilleure image possible, mais le gain était constant pour l'ensemble des traces d'un profil. De plus, ce type de gain permet de conserver les zones d'atténuation présentes dans les profils. Après, un filtre passe-bande et une soustraction de l'arrière-plan sont appliqués pour éliminer le bruit dans le profil. Finalement, une migration de Kirkoff est effectuée sur tous les profils pour ramener les hyperboles de diffraction en un point. Pour se faire, il faut préalablement trouver la vitesse de l'onde dans le milieu qui a été calculée à partir des nombreuses hyperboles de diffraction présentes sur l'ensemble des profils. La vitesse des ondes EM dans le sol a été établie à 0,06 m/ns et est très constante sur l'ensemble des profils. *ArcGIS* a été utilisé pour importer chacune des lignes de géoradar et, ainsi, diviser ces lignes en le même nombre de points que le nombre de traces qui constituent chaque profil. Il a donc été possible ainsi d'associer une position à chacune des traces de géoradar. Après toutes ces manipulations, chaque profil est importé dans *Gocad* où la correction topographique est effectuée.

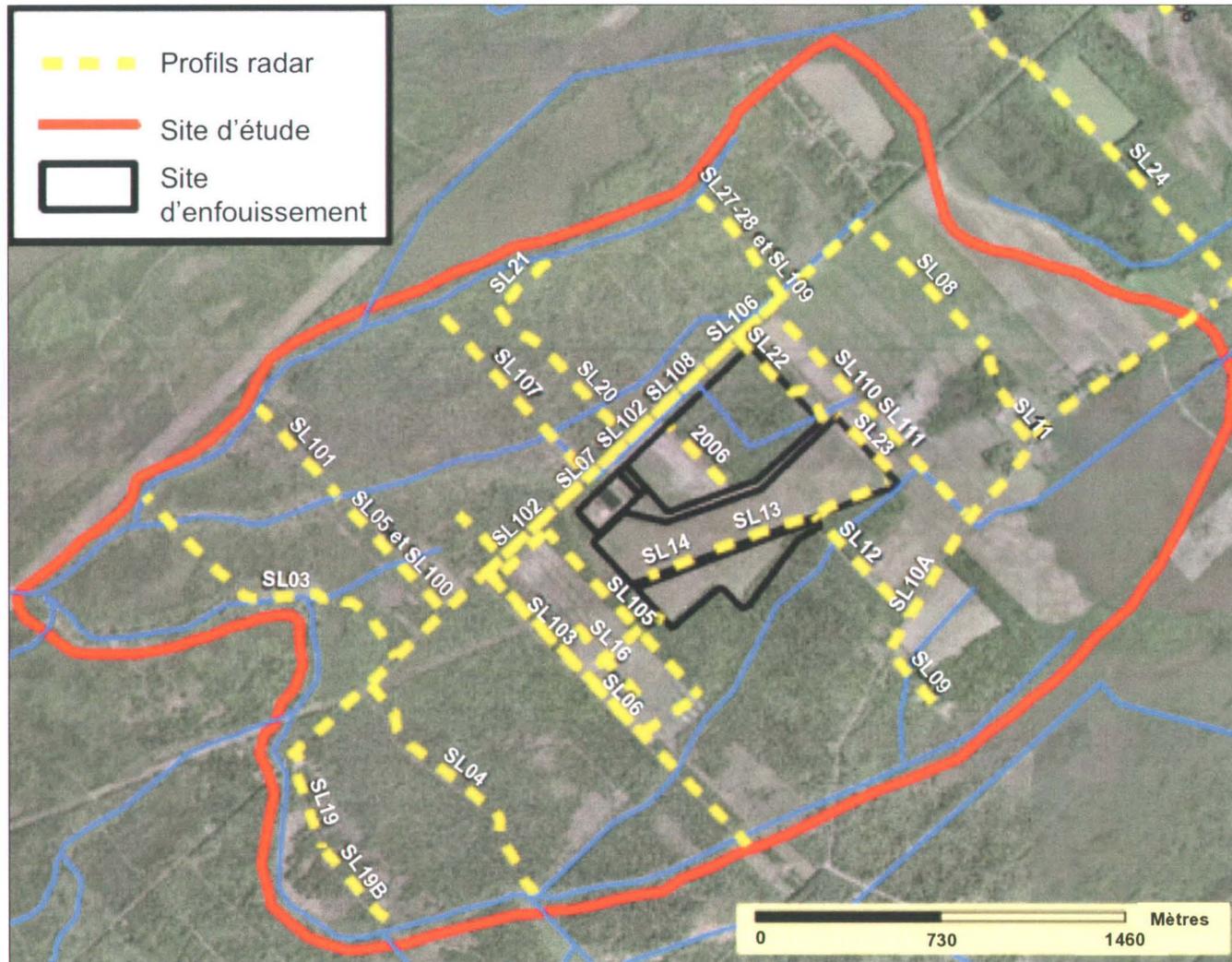


FIGURE 2.8 – Localisation des profils de géoradar (modifié [Tremblay et al., 2008])

Les profils de géoradar effectués sur le site de Saint-Lambert de Lauzon montrent bien la lithologie présente et aide à déterminer le mode de déposition des sédiments. Quand le roc n'est pas trop profond ou quand l'atténuation n'est pas trop forte, il est possible de suivre le réflecteur qui représente l'interface entre l'aquifère et le matériel sous-jacent (till ou roc). La topographie de ce réflecteur n'est habituellement pas très régulière. De plus, les zones avec de fortes atténuations sont importantes parce qu'elles peuvent correspondre aux endroits où le lixiviat se retrouve. En effet, l'eau de l'aquifère dans laquelle on retrouve du lixiviat est plus conductrice que l'eau de l'aquifère normale. Ainsi, le signal du géoradar est plus facilement dissipé dans le sol. Des tests sur l'eau ont confirmé cette hypothèse ([Tremblay et al., 2008]). Dépendamment de la conductivité de la première couche de la subsurface, les profils montrent des résolutions différentes à l'intérieur de l'aquifère sableux. Dans le cas du profil de la figure 2.6, le mode de déposition des sédiments est clairement visible, de même que l'interface entre l'aquifère et le roc/till (en bleu dans la figure). Ce dernier apparaît sur plusieurs des profils effectués sur le site. Cette information est cruciale pour contraindre la surface interpolée de la base de l'aquifère qui complète l'information disponible des puits. Sur ce même profil, il est possible de voir deux zones plus conductrices où l'atténuation du signal est plus forte entre 120-200 m et 290-390 m (entourée en rouge dans l'image). Malheureusement, les données de géoradar ne permettent pas de savoir si l'atténuation est due à la forte réflectivité de l'interface de la subsurface ou à un changement interne dans les propriétés

électriques du matériel ou du fluide. L'imagerie électrique en 2D permettra ainsi que les CPT permettront de répondre à cette question sur cet endroit plus précisément.

2.2.2 L'imagerie électrique

Principe général de l'imagerie électrique

L'imagerie électrique ou tomographie électrique de surface est une technique de géophysique qui utilise le courant électrique DC pour décrire les propriétés du sol telle que la conductivité électrique ([Delleur, 2007]). La conductivité électrique représente la capacité de mettre en mouvement des charges libres d'un milieu sous l'action d'un champ électrique ou la capacité du courant à circuler dans un milieu. Les sols et les roches sont des matériaux qui, selon leur nature, conduisent plus ou moins bien le courant électrique. La connaissance de cette propriété peut donner une bonne estimation de la lithologie et composition qui constitue la subsurface. En injectant dans le sol un courant d'intensité connue (I) à l'aide de deux électrodes de courant et en mesurant la différence de potentiel (ΔV) entre deux autres électrodes, on peut déterminer la résistivité électrique apparente (ρ_{app}) des matériaux

$$\rho_{app} = G * \frac{\Delta V}{I} \quad (2.4)$$

Le paramètre G est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure. Les unités de la résistivité électrique sont les Ωm . Pour obtenir une mesure de résistivité apparente, il suffit d'appliquer un courant entre deux électrodes plantées dans le sol (électrodes de courant C_1 et C_2 sur la figure 2.9), alors que la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes placées sur la même ligne (électrode de potentiel P_1 et P_2). Si on répète la mesure en un autre endroit où le sol est différent, sa réponse électrique sera elle aussi différente. En répétant la mesure sur plusieurs points, on peut construire un profil de la résistivité apparente en deux dimensions. La résistivité apparente obtenue sur un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui donnerait la même mesure ΔV pour la même configuration d'électrodes et le même courant injecté. Aussi, elle représente le résultat de la contribution volumique de toutes parcelles du milieu traversé par le courant émis en fonction de la distance à la source. Donc, elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des différentes couches que le courant traverse et du type de disposition des électrodes. Il faut aussi savoir que la densité de courant est plus forte près de la surface qu'en profondeur. Le choix du dispositif de mesure, ainsi que de l'équipement doit être fait avec précaution puisqu'ils influencent grandement la réponse obtenue. De plus, l'écartement entre électrodes détermine la profondeur d'investigation. Le dispositif dipôle-dipôle (figure 2.9) est particulièrement recommandé pour la caractérisation des variations latérales c'est pourquoi il a été choisi comme configuration des électrodes dans cette étude. La profondeur d'investigation

et le nombre de points de mesure sont plus grands que pour les autres dispositifs (entre $0.195L$ et $0.25L$ ($L=(n+2)a$)). Avec cet arrangement d'électrode, la constante G qui dépend de la géométrie vaut :

$$G = \pi a n(n + 1)(n + 2) \quad (2.5)$$

où n égale le nombre d'écartement et a , la distance constante entre les quatre électrodes.

La résistivité apparente qui est mesurée est appelée en pseudo-section (figure 2.10). Elle est construite en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Ainsi, les résistivités apparentes se distribuent selon une pseudo-profondeur. Ces résistivités apparentes doivent être transformées en résistivités dites vraies à des profondeurs correctes. Le processus pour effectuer ce traitement est une inversion numérique, ce qui signifie qu'à partir d'observations des résistivités apparentes, un modèle physique de la résistivité vraie est reconstruit.

L'inversion est un domaine complexe. Ainsi, dans ce projet, seul un survol de cette méthode sera présenté. Essentiellement, les méthodes d'inversion tentent de trouver un modèle de subsurface qui représente le mieux possible les valeurs obtenues sur le terrain. La définition d'un modèle est la représen-

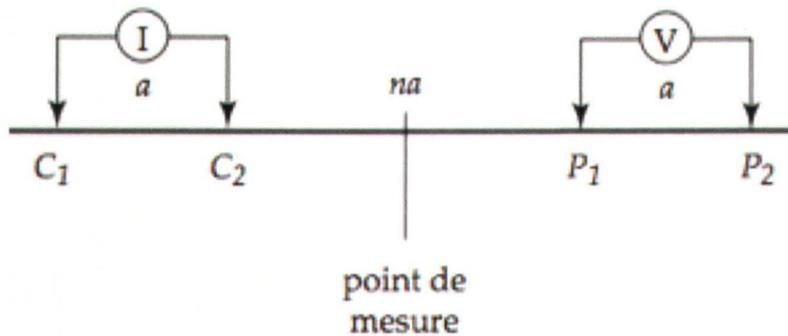


FIGURE 2.9 – Dispositif dipôle-dipôle

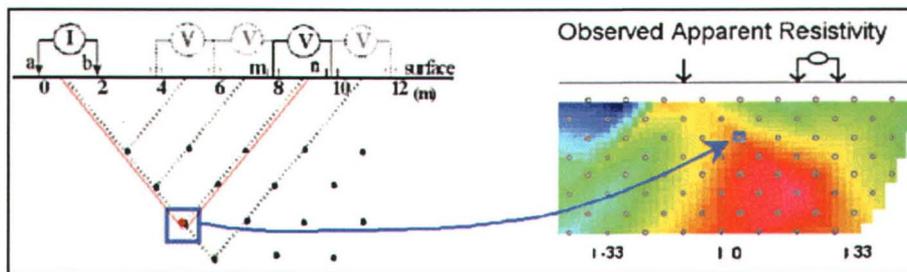


FIGURE 2.10 – Construction de la pseudo-section

tation mathématique d'une portion de la terre d'une façon idéalisée. L'inversion utilise un processus itératif pour tenter de minimiser l'écart entre la pseudo-section mesurée et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique dit vrai. À chaque itération, le modèle de résistivité vraie de base est modifié jusqu'à ce que les pseudo-section mesurées et calculées correspondent d'une façon acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible.

Le logiciel qui a été utilisé pour faire l'inversion est *Res2dinv* distribué par

Geotomo Software (version 3.58). La routine d'inversion utilisée est basée sur la méthode contrainte adoucie des moindres carrés (*smoothness-constrained least-squares method*) ([deGroot Hedlin and Constable, 1990]) ([Sasaki, 1992]) qui utilise l'algorithme conventionnel de Gauss-Newton ou le quasi-Newton optimisé ([Loke and Barker, 1996]). Cette méthode est basée sur l'équation (2.6) et (2.7).

$$(J^T J + \lambda F)d = J^T g \quad (2.6)$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (2.7)$$

Dans ces équations, f_x est le filtre d'aplatissement horizontal (*horizontal flatness filter*), f_z est le filtre de d'aplatissement vertical (*vertical flatness filter*), J représente la matrice des dérivées partielles, λ se trouve être le facteur d'amortissement, d est le vecteur de perturbation du modèle et g est le vecteur de divergence des pseudo-sections, F est la matrice de lissage (smoothing matrix) et J est la matrice Jacobienne. Ainsi, il est possible avec ce logiciel de modifier le facteur d'amortissement et les filtres d'aplatissement (*flatness*) pour correspondre à différents types d'a priori sur le modèle de sol. La mesure de l'ajustement du modèle est donnée par l'erreur quadratique moyenne (RMS) entre les pseudo-sections. Le logiciel permet de supprimer les mesures qui pourraient être considérées comme mauvaises pour qu'elles ne soient pas incluses dans l'inversion.

Il faut toutefois faire attention puisqu'une petite erreur quadratique moyenne peut quand même montrer de grandes et irréalistes variations dans le modèle de résistivité et peut mal représenter le modèle géophysique de la subsurface. L'approche prudente est souvent de choisir un modèle après que l'erreur quadratique ne change plus d'une façon significative, ce qui se produit souvent entre la troisième itération et la cinquième. Les résultats obtenus dépendront des paramètres choisis par l'utilisateur. Le choix du système de mesures est aussi crucial. Il est impératif d'avoir un système multiélectrodes et multicanal de grande précision permettant de faire l'acquisition d'un grand nombre de mesures en peu de temps.

Données et traitement des profils d'imagerie électrique

Le système qui a été utilisé pour réaliser les profils est celui de l'INRS-ETE (figure 2.12) qui est un système SYSCAL Pro avec 96 électrodes. Ce système permet de faire l'acquisition de profils linéaires de 500 m et jusqu'à une profondeur maximale de 60 m en environ deux heures. Un total d'environ 6 km de levés a été acquis, ce qui représente 27 levés tomographiques et 17 profils. La position des profils est montrée à la figure 2.11.

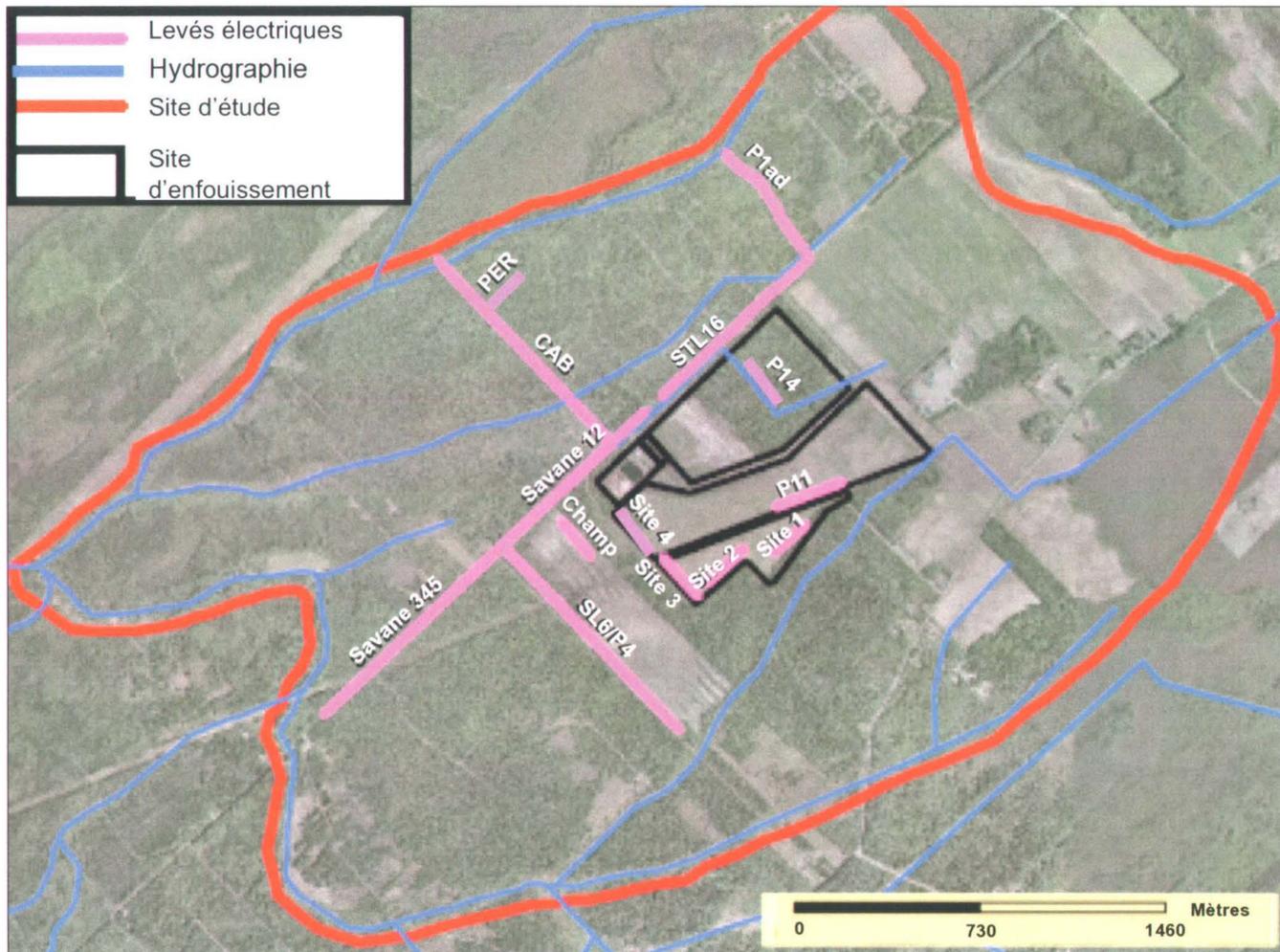


FIGURE 2.11 – Localisation des profils d'imagerie électrique

Pour respecter la topographie qui influence directement l'inversion, toutes les lignes de tomographie électrique ont d'abord été importées dans *ArcGIS*. Ensuite, elles ont été divisées par le nombre d'électrodes qui composait chacune des lignes. Ainsi, il était possible d'assigner une position en trois dimensions à chaque électrode. Les élévations ont été ensuite importées dans le logiciel *Res2dinv* pour effectuer l'inversion. Les meilleurs résultats étaient obtenus après cinq itérations avec une contrainte de lissage (*smoothing*) standard. La valeur par défaut du facteur d'amortissement a été conservée parce que sa variance n'influçait pas d'une façon significative l'erreur quadratique (RMS). De plus, plusieurs paramètres de l'inversion ont été testés pour valider les images finales et confirmer que les profils de résistivité sont supportés principalement par les données et non par les paramètres de l'inversion.

La figure 2.13A montre un profil de résistivité mesuré directement sur le site d'enfouissement sanitaire. L'image inversée (figure 2.13A3) montre des anomalies de faible résistivité associée avec la présence d'eau conductrice qui est typique de l'eau contenant du lixiviat. La figure 2.13B montre un profil de résistivité qui a été effectué en amont du site d'enfouissement au même endroit que le levé de géoradar montré à la figure 2.6. Le profil montre une résistivité plus forte que la figure 2.13A présentant la présence de sol très résistif avec de l'eau ne présentant pas de quantité significative de lixiviat. Dans cette image, il est toutefois possible de remarquer deux zones plus conductrices situées entre 64 et 160 m et 290-390 m et une remontée d'une

couche résistive associée au roc à 400 m.



FIGURE 2.12 – Système SYSCAL Pro de l'INRS-ETE

2.2.3 Combinaison des techniques

Afin d'obtenir une meilleure compréhension du sous-sol, il est pertinent de faire l'analyse conjointe des données de géoradar et d'imagerie électrique. En effet, le géoradar fournit une image haute résolution des interfaces entre les différents matériaux alors que l'imagerie électrique fournit une image basse

résolution des propriétés électriques intrinsèques des différents types de matériaux. La figure 2.14, au bas, montre un exemple d'interprétation conjointe où les données électriques inversées sont en couleur par-dessus le profil radar en tons de gris. L'interprétation conjointe permet d'obtenir une image haute résolution des interfaces grâce à l'image radar où il est possible de remarquer des dépressions, la stratigraphie, des zones d'atténuation et la base de l'aquifère granulaire. La tomographie électrique quant à elle permet de caractériser des zones plus conductrices en profondeur qui correspondent aux zones d'atténuation dans le levé de géoradar et de caractériser les matériaux tourbeux des piscines en surface (couleur verte). Ainsi, il est possible de déterminer où sont les zones d'anomalies géophysiques et ainsi d'installer les puits et CPT directement aux endroits intéressants pour la compréhension de l'aquifère. De cette façon, il est possible d'obtenir le maximum d'information au plus faible coût. Les CPT présents sur la figure 2.14 montrent une très bonne correspondance avec les données de géophysiques. En autres, les levés de radar montrent des zones d'atténuation qui correspondent à la diminution de la résistivité électrique sur les profils d'imagerie électrique. Cette information croisée permet l'implantation d'un puits et d'un CPT qui confirment la présence d'eaux plus conductrices dans ces zones, donc probablement de lixiviat.

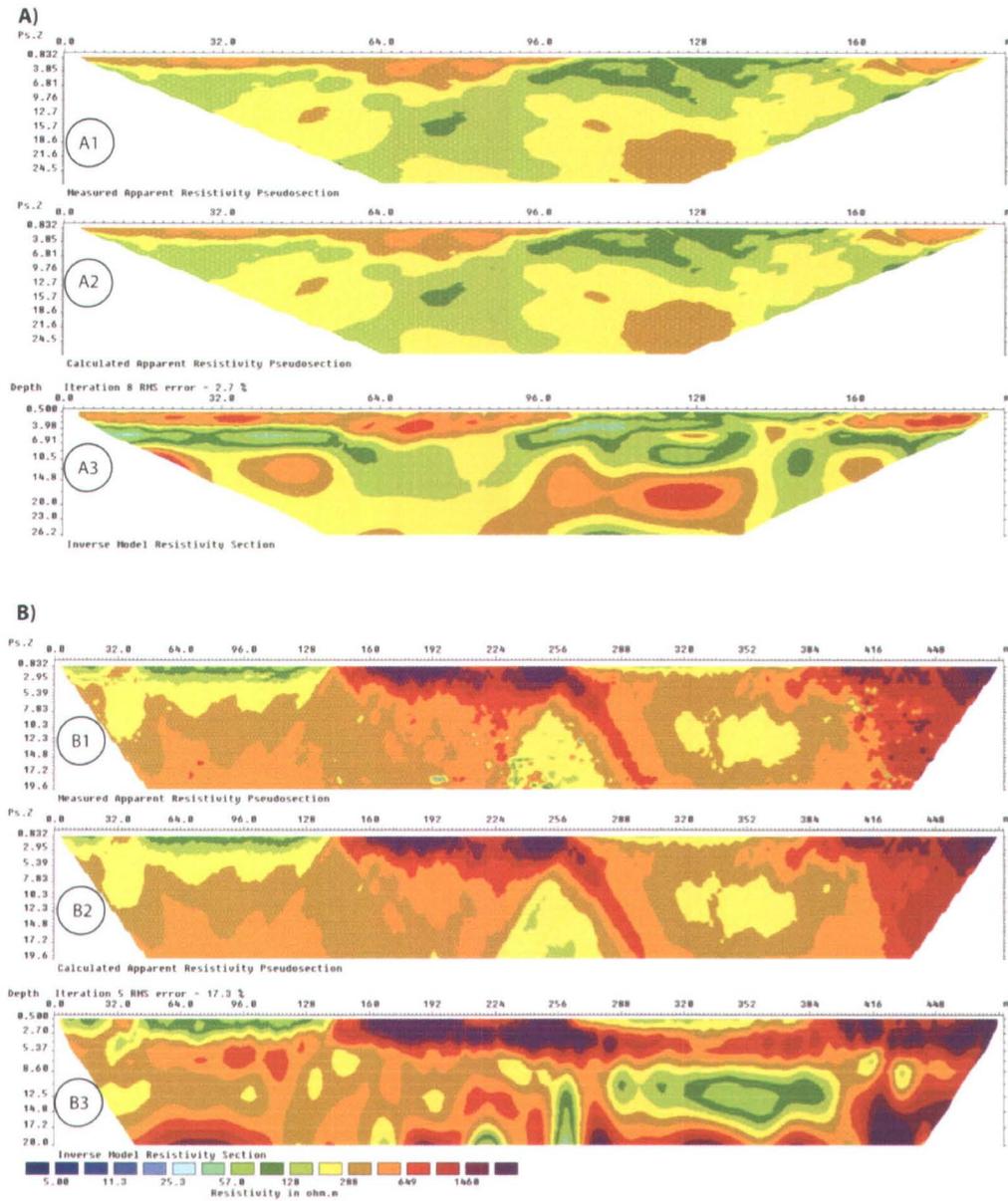


FIGURE 2.13 – A) Profil de résistivité électrique (*Champ*) effectué à proximité du site d'enfouissement. B) Profil de résistivité électrique (*P1ad*) effectué en amont du site d'enfouissement (au même endroit que le profil de géoradar de la figure 2.6). A1 : résistivité apparente mesurée; A2 : résistivité apparente calculée menant à A3; A3 : modèle de résistivité "vrai" inversée. B1 : résistivité apparente mesurée; B2 : résistivité apparente calculée menant à B3; B3 : modèle de résistivité "vrai" inversée.

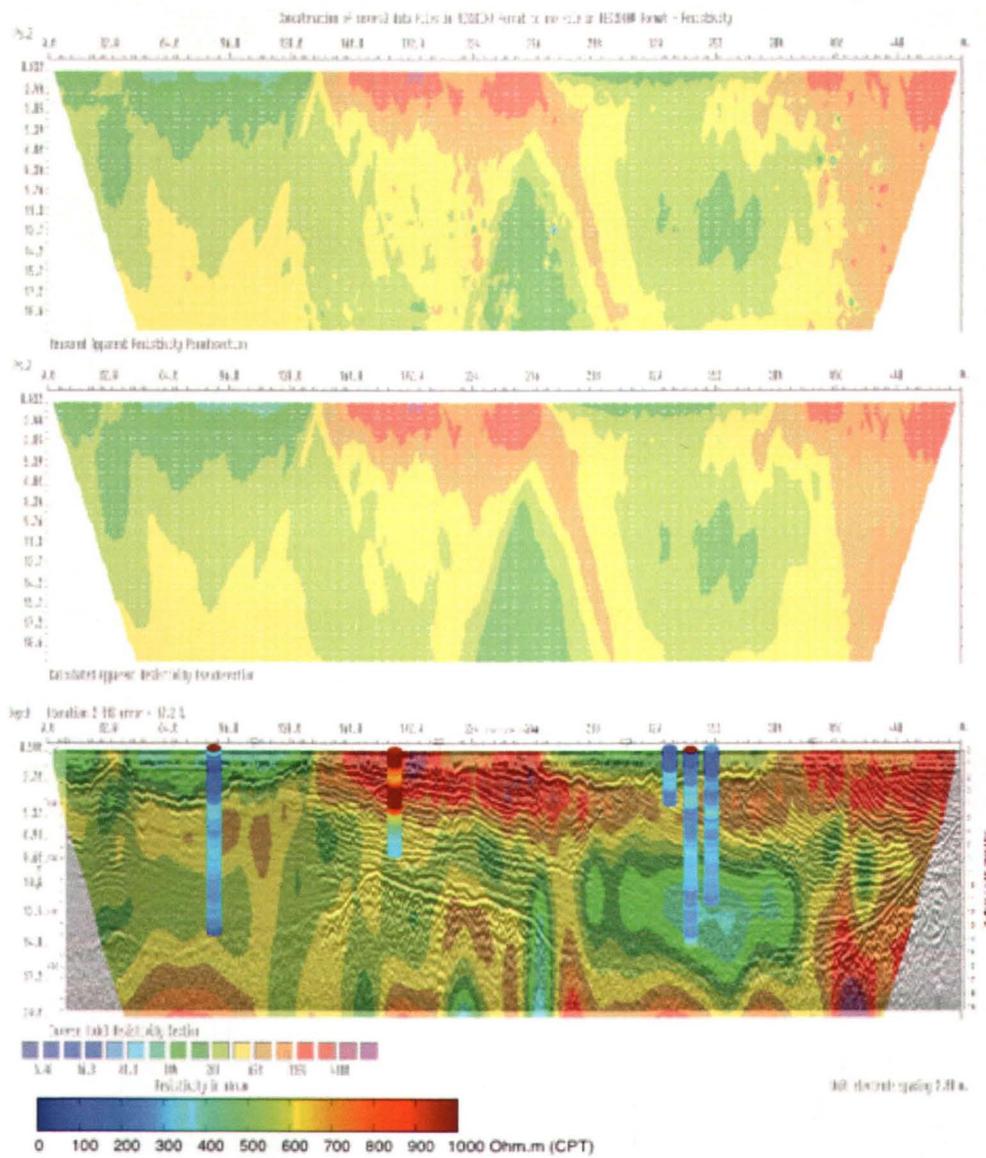


FIGURE 2.14 – En haut : résistivités apparentes mesurées ; Au milieu : résistivités apparentes calculées ; En bas : superposition du modèle électrique inversé, de l'image géoradar et des diagraphies électriques.

3 Géologie et hydrogéologie du site d'étude

L'aquifère est composé d'environ 10 m de sédiments quaternaires superficiels qui ont été déposés durant la présence de la Mer de Champlain ([Bolduc, 2003]). Ces sédiments sont principalement du sable fin à moyen, pourtant il est possible de retrouver une étendue de la granulométrie plus large allant du sable grossier à un silt argileux. Cette région a une hydrostratigraphie d'environnement littoral et plus précisément de flèche littorale ([Paradis et al., 2009]). Ce type de dépôt se caractérise par de minces langues de sable à la sortie d'estuaires qui sont parallèles à la côte (flèches littorales) s'attachant à celle-ci d'une part et dont l'autre extrémité est libre (figure 3.1). La stratigraphie de ce type d'environnement montre un important dépôt sableux s'amenuiser et lentement former des lentilles interdigitées avec du silt (figure 3.2). L'étude approfondie des données de forages provenant d'études préalables et des CPT a permis d'arriver à ces conclusions. Les

dépôts quaternaires reposent sur un socle rocheux accidenté qui a été modelé lors de l'orogénèse appalachienne. Le roc se compose principalement de roches sédimentaires comme du grès, des schistes à blocs, des conglomérats et des calcaires du Paléozoïque inférieur et de l'Ordovicien inférieur et moyen ([Landry and Mercier, 1983]). Son élévation actuelle est due aux périodes glaciaires qui ont érodé sa surface. Ainsi, il est recouvert de till de fond compact associé à ces épisodes.

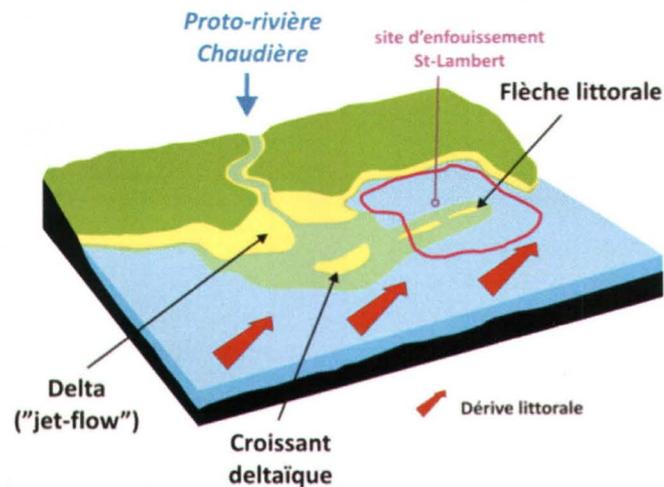


FIGURE 3.1 – Paléoenvironnement du site d'étude ([Paradis et al., 2009])

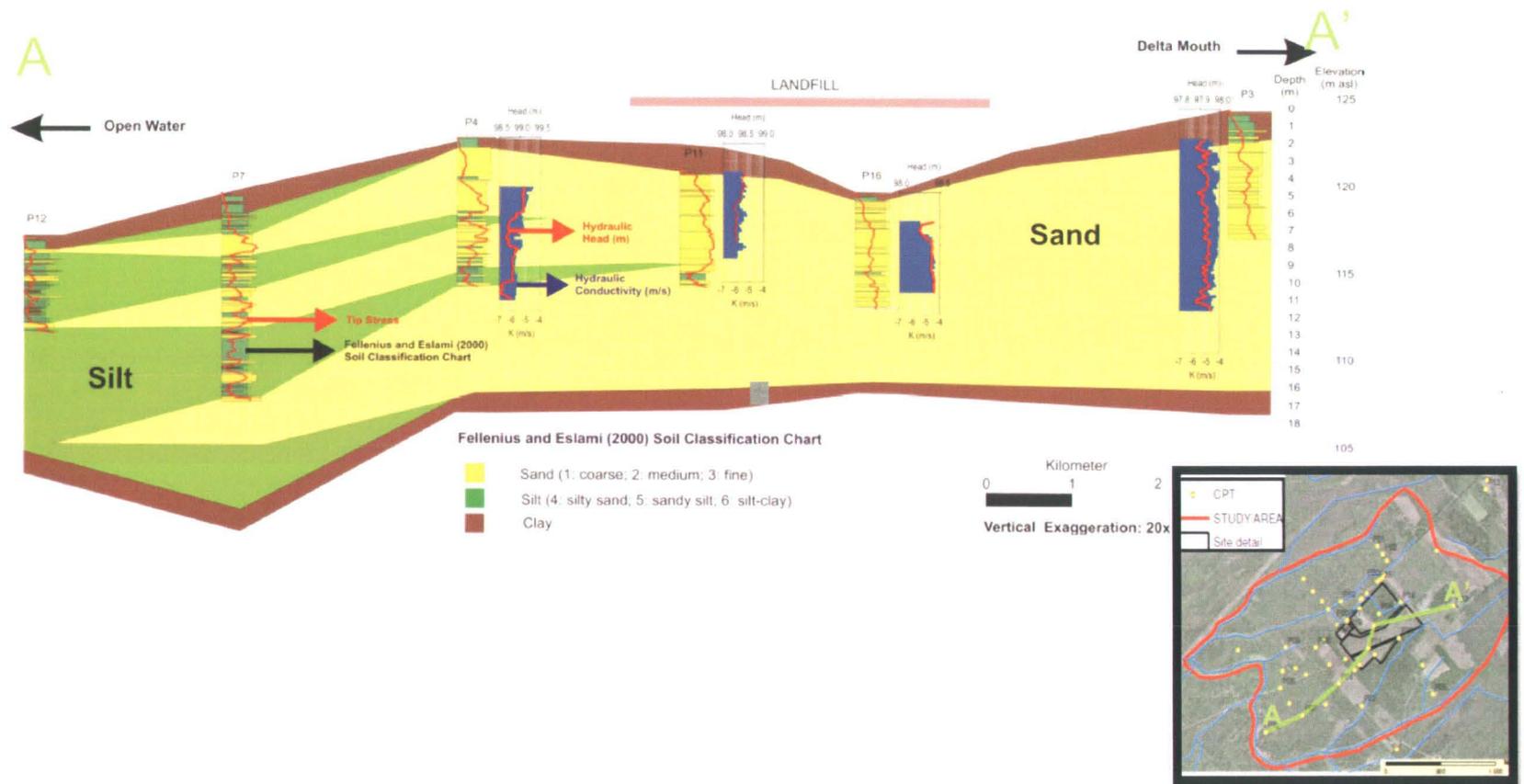


FIGURE 3.2 – Coupe stratigraphique du site d'étude ([Paradis et al., 2009])

Le profil de conductivité électrique et de charge hydraulique du site montre des conditions d'aquifère semi-confinée localement dues à l'environnement de flèche littorale. De même, le site présente une forte hétérogénéité au niveau des matériaux ainsi que très peu de continuité horizontale au niveau des unités. La surface de la nappe phréatique se retrouve à 1 ou 2 m sous la surface. L'aquifère repose sur ce qui est considéré la couche aquitard composée du roc irrégulier recouvert de till. Trois événements chronostratigraphiques peuvent être définis du fond au sommet des dépôts. Premièrement, une déposition de silt argileux marin a eu lieu lorsque le niveau de la Mer de Champlain était environ 180-200 m asl. L'élévation du site d'étude actuel est à peu près de 120 m asl. La deuxième phase correspond à l'épisode de flèche littorale elle-même alors que le niveau de la mer avait approximativement la même élévation que le site de nos jours. Les sédiments deviennent de plus en plus grossiers vers le haut, donc ils passent du silt vers le sable atteignent un maximum puis s'inversent en devenant de plus en plus fins en passant du sable au silt. Cette tendance a été observée dans tous les CPT faits sur le site, soit plus de 25. La dernière unité est une couche de silt argileux discontinue qui est reliée probablement au retrait de la Mer de Champlain ([Paradis et al., 2009]). Les eaux souterraines naturelles ont une signature géochimique particulière qui peut être très variable dans l'espace du site à l'étude. Les eaux de lixiviation ont aussi une signature spécifique qui permet de les reconnaître à proximité du site d'enfouissement.

4 Construction d'un modèle hydrostratigraphique par l'intégration des données géophysiques multivariables

L'objectif de ce projet est d'intégrer toute l'information hydrogéophysique disponible sur le site d'enfouissement sanitaire de Saint-Lambert-de-Lauzon dans le but d'aider à produire un modèle numérique d'écoulement de haute résolution. Il est crucial d'intégrer toutes les données directement en 3D dès le début d'un projet, car il est très difficile d'imaginer ce qui se passe en 3D en comparant seulement des données 1D et 2D de différentes sources. De plus, les représentations en 2D ne permettent pas de comprendre la complexité des différentes interfaces d'un aquifère et la continuité spatiale des structures complexes ne peut pas être représentée en 2D. Il a donc été nécessaire d'uti-

liser un outil d'intégration en 3D pour bâtir un modèle hydrogéologique qui représente la variabilité et la complexité d'un aquifère à partir d'un nombre important de données de différentes sources.

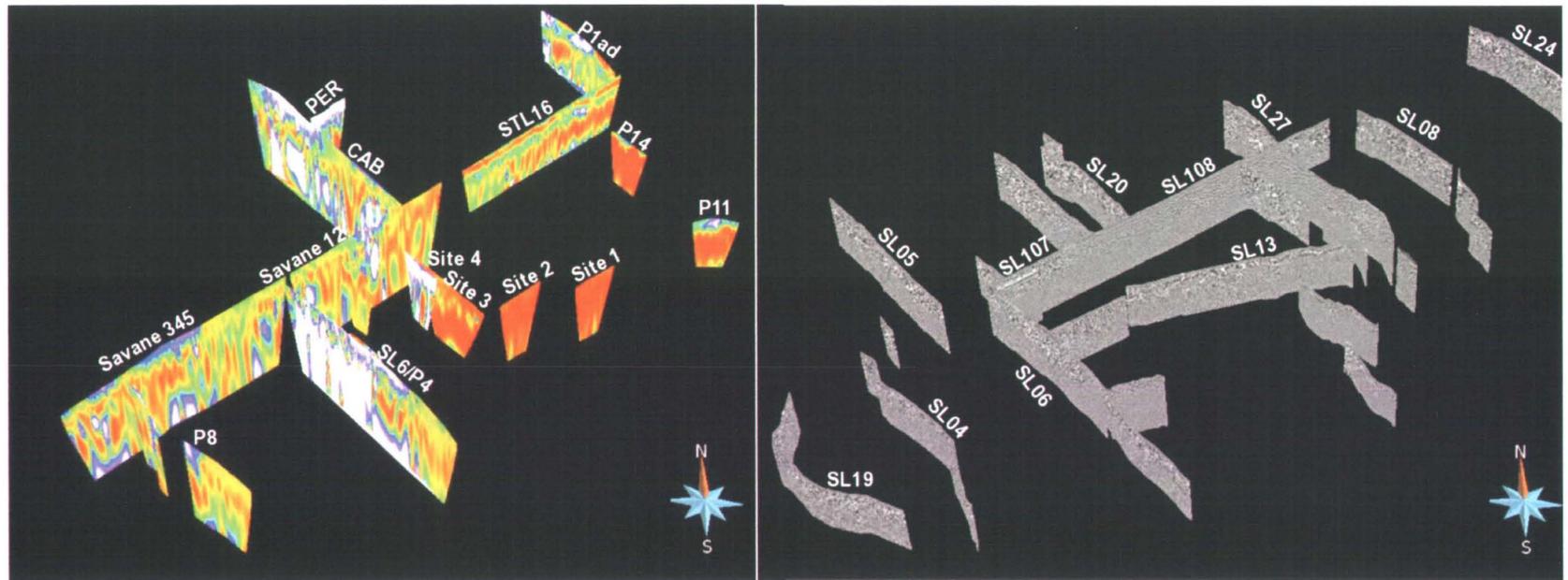


FIGURE 4.1 – L'ensemble des profils de tomographie électrique et de radar dans *Gocad*

Le logiciel utilisé pour l'intégration est *Gocad* (Paradigm Geophysical) (figure 4.1). Le logiciel permet la visualisation rapide et l'interprétation de données 3D de différentes sources. La construction du modèle directement en 3D a permis de sauver du temps et d'avoir un meilleur contrôle spatial sur les données adjacentes les unes avec les autres. Ainsi, il est plus facile et rapide d'avoir une compréhension globale du comportement stratigraphique même si l'information provient de profils 2D. De cette façon, le comportement stratigraphique souvent complexe peut être compris plus facilement. Ces mêmes structures peuvent être reliées entre elles pour former des surfaces directement dans le logiciel. Ainsi, les interfaces de la base de l'aquifère et des dépressions comblées de sables silteux ont été déterminées de cette façon (figure 4.3). De plus, il y a un meilleur contrôle sur l'épaisseur des sédiments, ce qui joue un rôle primordial dans l'écoulement. Aussi, les différents types de données sont directement à la bonne échelle et il est possible de détecter la présence potentielle du lixiviat visuellement directement dans le modèle en 3D. Pour résumer, les données intégrées dans le modèle 3D sont les CPTu, les profils de radar géologique, les profils de tomographie électrique et les limites de l'aquifère établies par géostatistique.

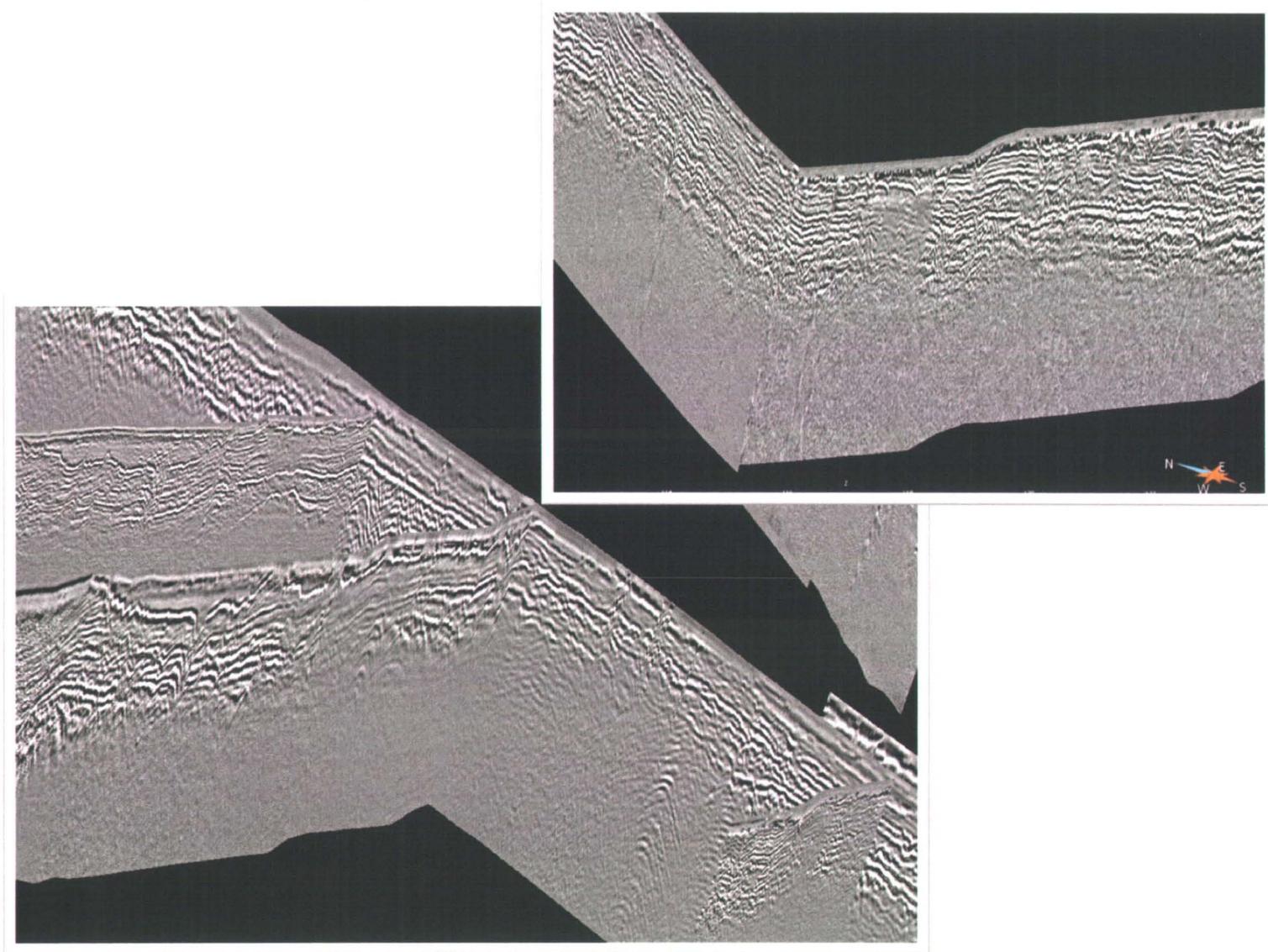


FIGURE 4.2 – La continuité des structures est beaucoup plus facilement compréhensive en 3D

4.1 CRÉATION DE SURFACES

L'analyse de différents types de données permet de retirer de l'information complémentaire et d'obtenir une conception plus complète d'un phénomène. Ainsi, l'analyse complémentaire des CPT et du signal géoradar délimite le fond de l'aquifère en associant le bon réflecteur à la couche de till. Ce n'est pas l'ensemble des profils de géoradar qui ont une pénétration suffisante pour détecter cette surface. Généralement, les profils qui ont été effectués au nord du site d'étude montrent une meilleure pénétration. Aucun signal ne pénètre le sol directement sur le site d'enfouissement sanitaire en raison de la grande conductivité électrique des couches géologiques et du fluide. Dans les zones où le signal radar pénètre, le réflecteur marquant le commencement du till a une signature qui lui est propre (figure 2.6). Elle est constituée d'une forte réflexion ainsi que d'une multitude d'hyperboles de diffraction à cause de la présence de blocs dans le till. Dans le cadre de ce projet, une surface représentant l'interpolation de la base de l'aquifère a été construite. Pour se faire, des données régionales de profondeur au roc provenant de la base de données des puits et de différentes firmes privées ont été utilisées. Ces données, pratiquement inexistantes sur le site d'étude, permettent de contraindre la tendance régionale la profondeur au roc. De plus, les valeurs de profondeur au till acquises à l'aide des CPT ainsi que les coordonnées des affleurements sur le site ont été utilisées. Finalement, le réflecteur associé au fond de l'aquifère sur les profils de géoradar a été pointé directement sur les profils dans

Gocad. L'ensemble de ces points a été utilisé pour l'interpolation de cette surface qui s'est fait avec l'interpolateur DSI de *Gocad*. La figure 4.3 montre la surface interpolée. De la même façon, au nord du site d'enfouissement, il existe des sortes de dépression plus conductrices en surface qui sont visibles sur plusieurs profils parallèles de géoradar. L'interpolateur DSI a de nouveau été utilisé pour imager la continuité spatiale de cette couche lithologique. Ce réflecteur très évident sur les profils radars adjacents a été pointé directement sur les profils de géoradar. La figure 4.4 montre la topologie de cette surface.

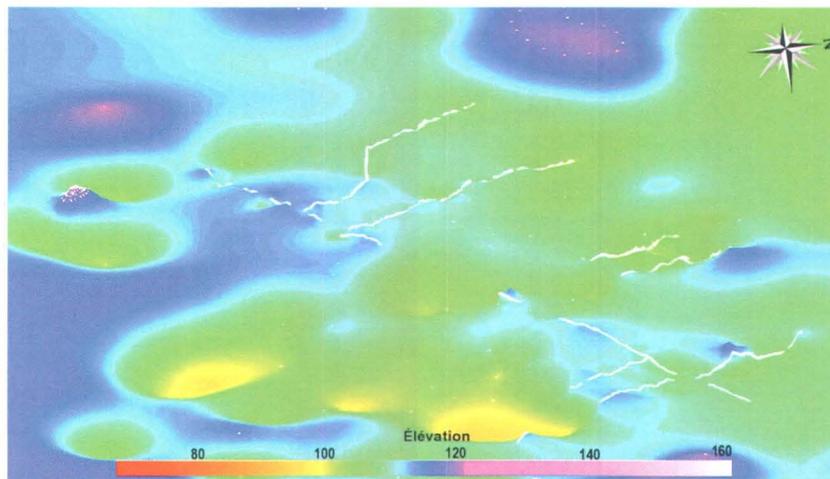


FIGURE 4.3 – La surface de la base de l'aquifère a pu être déterminé à partir des CPT et des levés de radar

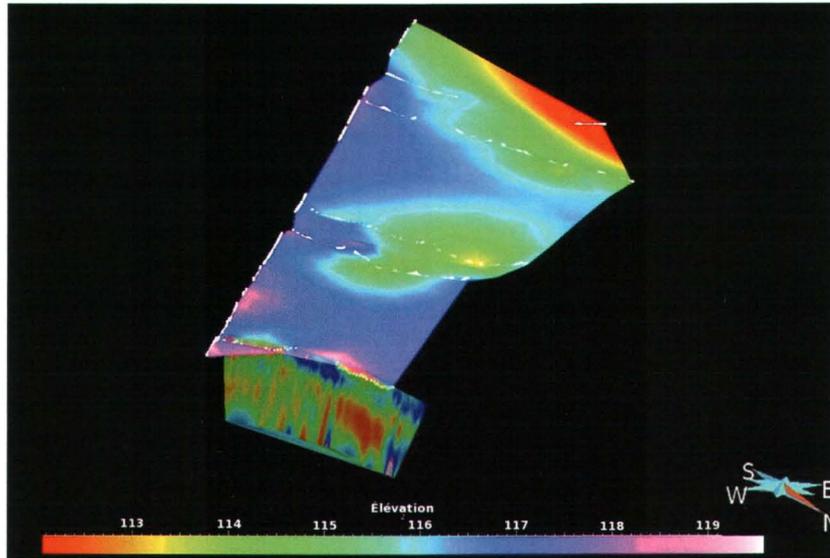


FIGURE 4.4 – La surface d’une dépression conductrice de l’aquifère a pu être déterminé à partir des levés de radar

4.2 DÉFINITION ÉLECTRIQUE DE L’HYDROSTRATIGRAPHIE

Un avantage indéniable du modèle en 3D construit dans *Gocad* est la possibilité de directement visualiser en 3D les relations entre les différentes mesures.

L’imagerie électrique fournit une image de basse résolution des propriétés électriques intrinsèques des matériaux. Cette imagerie continue permet d’obtenir des renseignements sur la composition et la continuité des unités géologiques autant que sur la présence d’un fluide conducteur. En combi-

nant les autres mesures géophysiques (CPT, profils radars) avec les profils de tomographie électrique, il est possible d'identifier des zones ayant des résistivités semblables et de leur associer à un hydrofaciès. Plus spécifiquement, pour caractériser l'hydrostratigraphie, les profils de résistivité de la tomographie électrique ont été attentivement étudiés, puis comparés aux résistivités des CPT. Il est très difficile de comparer les résistivités des CPT et des profils de tomographie électrique sans la visualisation 3D. En effet, les résistivités diffèrent grandement pour un même endroit en raison de la faible résolution de la tomographie comparativement aux données de haute précision des CPT. Les deux éléments montrent sensiblement les mêmes variations, mais souvent avec des amplitudes différentes. De ce fait, l'intégration 3D facilite grandement cet exercice. En isolant uniquement le système aquifère (on néglige tout ce qui se passe sous l'interface till-sable) grâce à la surface créée précédemment, il a été possible de séparer l'aquifère en différents secteurs qui possèdent des conductivités qui leur sont spécifiques. Les levés de géoradar ont permis de déterminer si les anomalies rencontrées étaient dues à un changement brusque dans la composition du sol visible par une brisure de la continuité des couches ou à une autre raison comme la présence d'un fluide plus ou moins conducteur.

Après analyse, le site d'étude semble posséder trois différentes zones avec des propriétés électriques distinctes causées soit par différentes propriétés du sol ou différentes fluides présents dans l'aquifère. Le site a donc été séparé en

sections distinctes présentées à la figure 4.5. La zone 1 se retrouve au nord-est du site d'étude, la zone 2 est au sud-ouest et la zone 3 se situe directement sur le site d'enfouissement sanitaire. Encore une fois, chaque zone a été divisée en fonction de leurs propriétés électriques différentes. Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 présentent les résistivités électriques pour chaque section dans chaque zone. Malgré le fait qu'il existe des valeurs théoriques de résistivité pour les différents types de sol, il est préférable d'établir ces valeurs typiques directement sur le site d'étude selon la zone. En effet, d'importantes variations peuvent être observées d'un site à l'autre pour le même type de matériel. Il est à noter que les valeurs représentent un intervalle approximatif de l'étendue de la résistivité autant dans le cas de la tomographie que des CPT. Pour chaque zone, deux CPT ont été choisis parce qu'ils étaient représentatifs des sections de résistivité délimitées. Aussi, ils permettent d'illustrer la différence des valeurs entre les CPT et les profils de tomographie électrique.

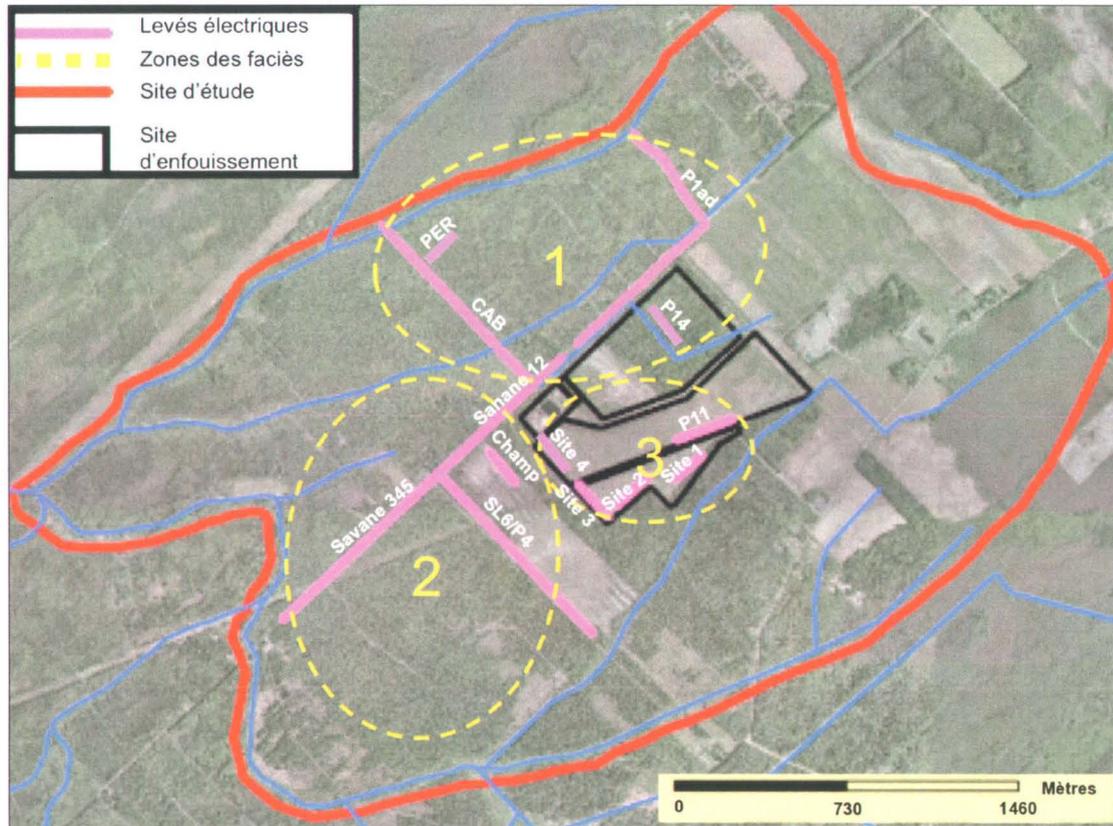


FIGURE 4.5 – Les différentes zones décrivant des hydrofaciès aux propriétés électriques différentes

Zone 1 : nord et est du site d'étude									
Profondeur indicative	Type de sol	Résistivité typiques des profils					Résistivité moyenne des profils	Résistivités typiques de deux CPT	
		STL16	P14	P1ad	CAB	PER		G16S0801C	P02
m	-	ohm-m					ohm-m	ohm-m	
0 à 5 (A sur fig 4.6)	Sable Anomalie de forte résistivité	600-2000	900-6000	700-1600	1000-11300	700-19000	600-10000	-	650-1600
0 à 2,5 (B sur fig 4.6)	Sable silteux un peu d'argile	75-300	80-150	70-150	-	-	75-220	140-300	-
2,5 à 10 (C sur fig 4.6)	Sable un peu de silt	600-1000	300-600	300-1050	10-300	500-700	300-700	150-421	300-600
10 à 12 (D sur fig 4.6)	Silt et argile un peu de sable	30-250	50-150	60-120	100-200	100-300	60-200	100-170	-

TABLE 4.1 – Résistivités pour la zone 1 au nord et à l'est du site d'étude

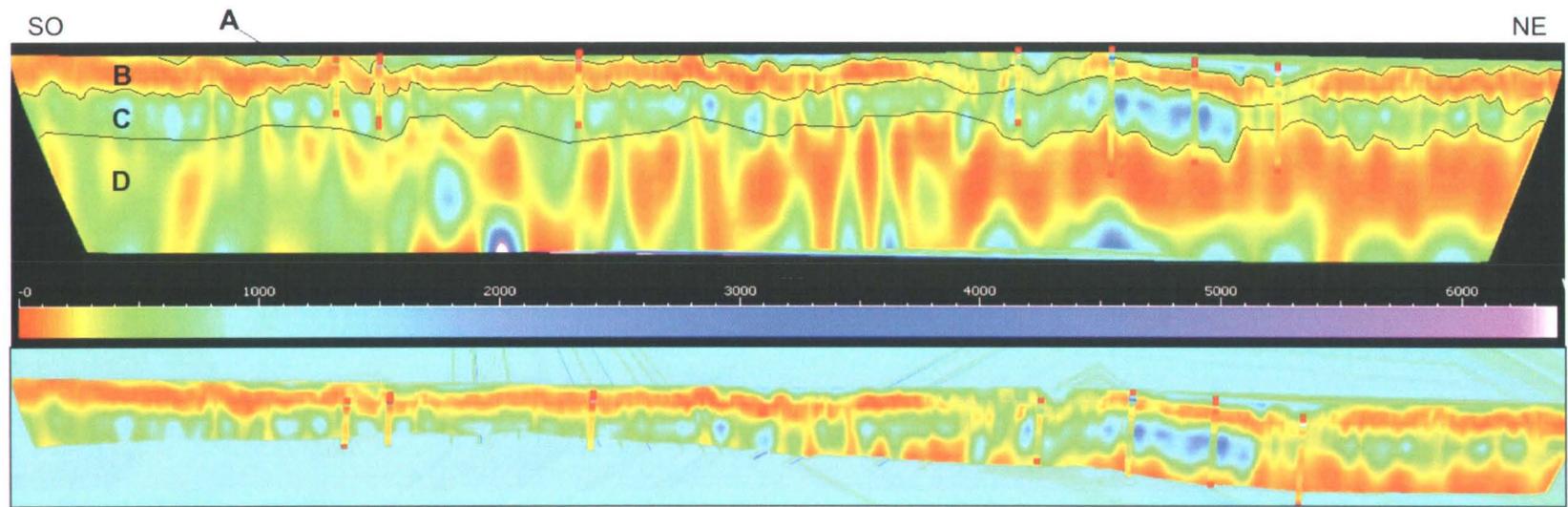


FIGURE 4.6 – Exemple de profil pour la zone 1 : STL16. La figure du haut montre le profil et la figure du bas montre le même profil avec la surface de la base de l'aquifère.

Zone 2 : l'ouest du site d'étude

Profondeur indicative	Type de sol	Résistivité typiques des profils					Résistivité moyenne des profils	Résistivités typiques de deux CPT	
		Savane 12	Savane 345	P4/SL06	Champ	P8		G17U0901C	G16U0902C
m	-	ohm-m					ohm-m	ohm-m	
0 à 2 (A sur fig 4.7)	Sable/Silt Anomalie de forte résistivité	600-15000	400-3500	500-18000	-	500-10000	500-10000	300-1200	-
0 à 4 (B sur fig 4.7)	sable silteux	300-600	350-600	250-800	300-650	250-400	250-700	-	75-200
4 à 12 (C sur fig 4.7)	Lamination de sable et silt	40-300	20-900	20-500	50-200	30-300	300-900	120-250	100-230

TABLE 4.2 – Résistivités pour la zone 2 à l'ouest du site d'étude

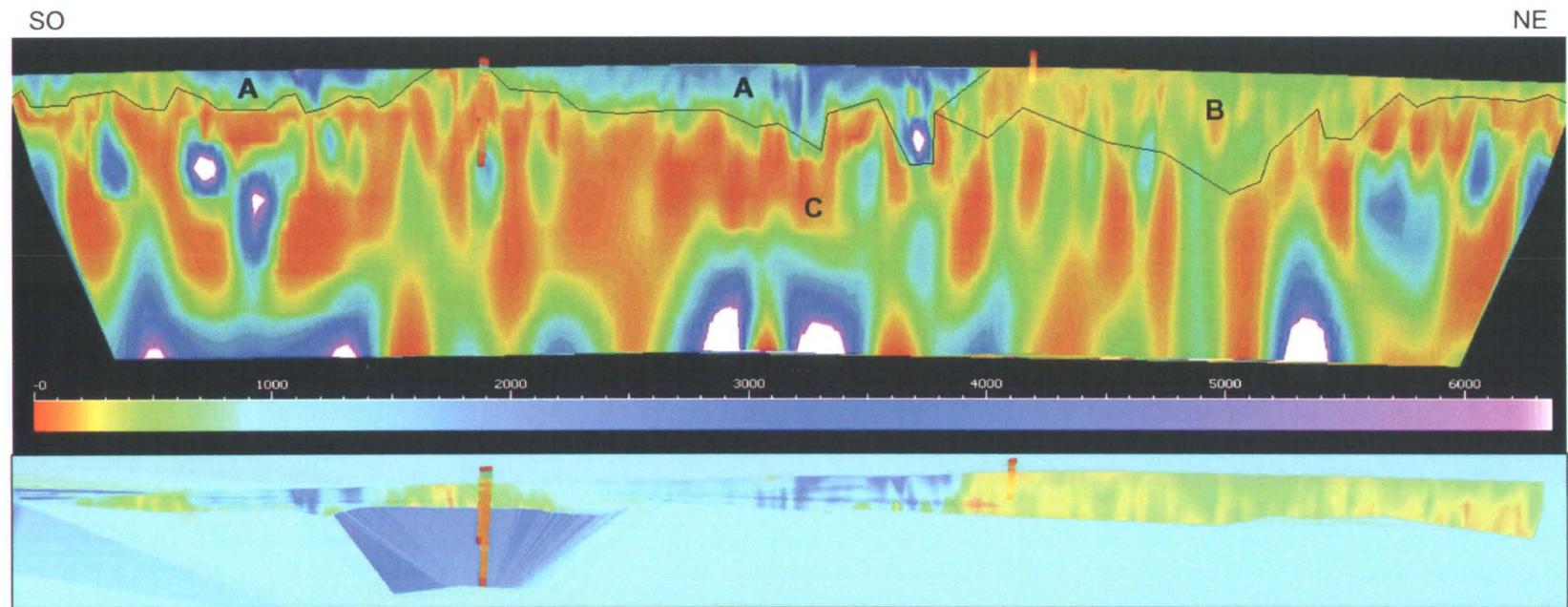


FIGURE 4.7 – Exemple de profil pour la zone 2 : Savane 345. La figure du haut montre le profil et la figure du bas montre le même profil avec la surface de la base de l'aquifère.

Zone 3 : le site d'enfouissement

Profondeur indicative	Type de sol	Résistivité typiques des profils					Résistivité moyenne des profils	Résistivités typiques de deux CPT	
		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	P11		G22U0901C	G28O0807C
m	-	ohm-m					ohm-m	ohm-m	
0 à 3 (A sur fig 4.8)	Sable silteux	50-124	35-110	25-110	800-2900	200-600	25-500	60-160	300-800
3 à 9 (B sur fig 4.8)	Sable	10-30	5-30	30-500	800-10000	5-110	10-150	25-70	230-350
9 à 11 (C sur fig 4.8)	Sable silteux un peu d'argile	60-300	45-200	30-200	-	30-150	30-200	120-210	-

TABLE 4.3 – Résistivités pour la zone 3 sur le site d'enfouissement sanitaire

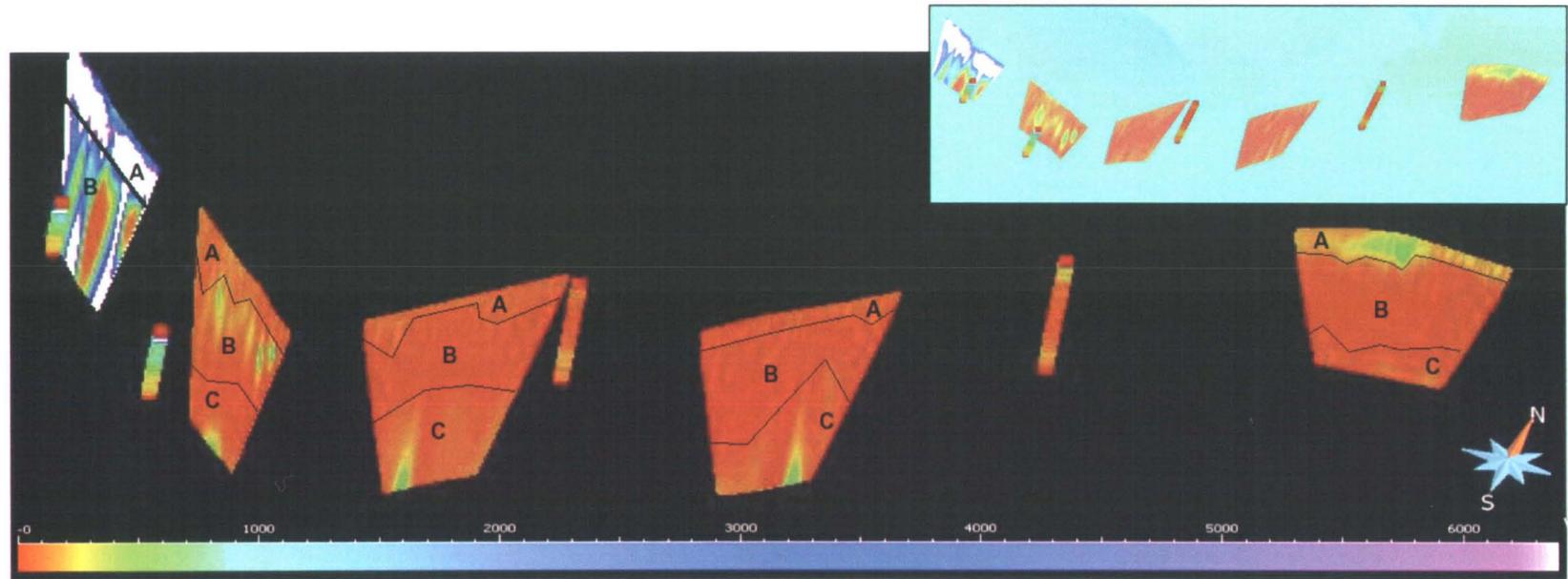


FIGURE 4.8 – Ensemble des profils pour la zone 3. De gauche à droite : site 4, site 3, site 2, site 1 et P11. Le coin supérieur montre les mêmes profils avec la surface de la base de l'aquifère.

La zone 1 se situe au nord-est du site d'étude. Elle comprend les profils de résistivité *STL16*, *P14*, *P1ad*, *CAB* et *PER*. Les CPT *G16S0801C* et *P02* ont été choisis pour illustrer les résistivités types retrouvées dans cette zone. Le premier se retrouve directement sur le profil *STL16* et le second sur le profil *P1ad*. La figure 4.6 présente le profil *STL16* qui montre le comportement typique propre à cette zone. Généralement, la zone 1 montre des couches régulières horizontales successives. Le profil *STL16* montre des sections de différentes résistivités aux contrastes bien marqués. La première couche rencontrée possède une grande résistivité soit entre 600 à 2000 ohm-m. Cette couche est principalement composée de sable. Plusieurs CPT laissent supposer que cette couche serait associée à la zone non saturée du sol. Cette conclusion serait logique puisque les valeurs de résistivité augmentent d'une façon importante dans la partie non saturée du sol dû à une saturation en eau réduite. Lorsque la résistivité chute brusquement, la pression dans les pores ainsi que de la permittivité augmentent de manière importante. Pourtant, ce n'est pas l'ensemble des CPT qui montre cette particularité. Il existe des endroits qui sont encore plus résistifs dans cette même couche. Ces anomalies peuvent atteindre jusqu'à 10 000 ohm-m. Les profils *P14*, *CAB* et *PER* montrent ces valeurs extrêmes de résistivités. Les levés de radar démontrent que cette résistivité anormalement élevée n'est pas due à un changement dans le type de sol. En effet, les levés montrent qu'il y a une continuité des dépôts. Ainsi, l'explication de cette anomalie ne peut être qu'associée à la sensibilité des appareils de mesure électrique qui sont peu efficaces dans les

environnements résistifs. Une autre catégorie de résistivité se retrouve à la même profondeur que cette couche de sable à forte résistivité. Elle est soit la première couche rencontrée soit elle se retrouve sous la première qui a été décrite. Le profil *STL16* (figure 4.6) montre très bien ce phénomène. Cette couche est constituée de sable silteux et parfois d'un peu d'argile. Les valeurs de résistivité représentent bien la composition du sol. En effet, elles diminuent beaucoup pour atteindre des valeurs entre 75 à 220 ohm-m, ce qui est normal pour ce type de sol. Les valeurs des CPT sont un peu plus fortes pour cette section comme le témoigne le CPT *G16S0801C* avec des valeurs de 140 à 300 ohm-m. La plus importante couche de cette zone est composée de sable. Du silt se retrouve aussi dans cet intervalle, mais en très faible quantité. L'écart entre les valeurs extrêmes est important partant d'environ 300 ohm-m jusqu'à 700 ohm-m. Pourtant, cette couche semble très continue sur l'ensemble de la zone avec une épaisseur considérable compte tenu de la profondeur de l'aquifère. L'ensemble des profils montre en effet distinctement cette couche. Les CPT montrent des valeurs de résistivité variables d'un à l'autre. Toutefois, ces valeurs demeurent généralement à l'intérieur de l'intervalle décrit. L'ensemble des profils montre distinctement cette couche. Finalement, la dernière couche se compose de silt et d'argile avec un peu de sable. Cette couche est présente juste au-dessus du till et son épaisseur est plus ou moins constante. Les profils montrent des résistivités plus faibles pour cette couche soit entre 60 et 200 ohm-m. De même, la résistivité des CPT diminue pour atteindre des valeurs normales pour ce type de sol. De

cette façon, le fond de l'aquifère devient très évident en raison de la présence de cette couche. De plus, les levés de géoradar lorsqu'ils sont comparés à la tomographie électrique montrent bien que cette zone identifie bien le fond de l'aquifère.

La zone 2 est située au sud-ouest du site d'étude. Les profils de résistivité qui la traversent sont *Savane 12*, *Savanes 345*, *P4/SL6*, *Champ* et *P8*. La résistivité précise est illustrée par les CPT *G17U0901C* et *G16U0902C* qui ont été choisis pour illustrer la résistivité qui se retrouve dans cette zone. Le CPT *G17U0901C* est localisé sur le profil *Savanes 345* dans la partie sud-ouest du profil, alors que le CPT *G16U0902C* se retrouve au sud du profil *P8*. La figure 4.7 présente le profil *Savanes 345* qui a été choisi pour montrer le comportement typique de cette zone. Cette zone se sépare principalement en 3 couches différentes. La première se compose généralement soit de sable soit de silt ou les deux. Celle-ci est très résistive. De plus, elle pourrait se subdiviser en deux autres couches. D'abord, une catégorie de résistivités entre 500 à 900 ohm-m dans certains endroits des profils. Comme dans la zone précédente, il pourrait être possible que ces couches soient des emplacements où ce sol n'est pas complètement saturé, mais ce n'est pas l'ensemble des CPT qui en témoigne. Puis, il y a les couches avec des anomalies de très fortes résistivités qui peuvent facilement atteindre 10 000 ohm-m et même les dépasser. Celles-ci sont beaucoup plus fréquentes et importantes que dans la zone 1. En effet, cette couche anormalement résistive fait parfois

tout l'épaisseur de l'aquifère, ce qui est observable lorsque les profils sont regardés avec la surface de la base de l'aquifère. La figure 4.7 montre bien cette particularité. Pourtant, aucun CPT n'a été effectué à ces endroits. La nature exacte de cette anomalie demeure donc inconnue. Pourtant, sachant que le géoradar montre à ces endroits une continuité stratigraphique, il est possible de conclure que cet effet n'est pas dû à un changement dans les dépôts. Ensuite, une petite couche de sable silteux apparaît dont la résistivité oscille entre 250 et 700 ohm-m. Elle n'est pas présente partout et elle n'est pas toujours facile à distinguer avec la prochaine couche. La troisième couche est la plus importante au niveau de son épaisseur de cette zone. Elle montre globalement des couches successives de sable et de sable silteux qui s'accompagnent quelquefois d'argile. Dans certains endroits des profils, des laminations bien marquées de faible épaisseur se succèdent d'une façon répétée et égale. Généralement, cette couche est très conductrice (20-300 ohm-m), mais l'étendue globale de la résistivité sur les profils reste importante (de 20 à 900 ohm-m). Les CPT montrent habituellement des valeurs plus faibles que les profils pour le même intervalle (100 à 250 ohm-m).

La zone 3 se retrouve directement sur les terrains du site d'enfouissement sanitaire. Les profils de résistivité qui en font partie sont *Site 1*, *Site 2*, *Site 3*, *Site 4* et *P11*. Les CPT choisis pour illustrer cette zone sont *G22U0901C* et *G28O0807C*. Le CPT *G22U0901C* est situé à proximité du profil *Site 2*, alors que le CPT *G28O0807C* se retrouve au centre du profil *Site 3*. La

figure 4.8 présente l'ensemble des profils de cette zone. Premièrement, ces profils sont caractérisés par une conductivité globale beaucoup plus élevée que les autres profils du site d'étude. Pourtant, un seul coup d'œil permet de remarquer que le profil *Site 4* diffère grandement des autres situés dans cette zone, et ce, même s'il est situé à quelques mètres de *Site 3*. Sa particularité sera traitée plus tard dans ce paragraphe. Une première épaisseur de dépôt correspondant à un mélange de sable et de silt montre une résistivité de 25 à 500 ohm-m. Ces valeurs peuvent être considérées comme normales pour ce type de dépôt. Comme le témoigne le CPT *G28O0807C*, le profil *Site 3* est un peu plus résistif et le profil *P11* semble aussi montrer une première couche plus résistive. Pourtant, la continuité de cette couche apparaît clairement à travers tous les levés. Ensuite, vient une couche visiblement plus conductrice dans les profils de résistivité. Elle présente des résistivités entre 10 et 150 ohm-m. Le CTP présent sur le profil *Site 2* montre même des résistivités oscillant entre 25-70 ohm-m. Les deux CPT indiquent que cette zone est exclusivement constituée de sable plus ou moins fin. Cette très forte conductivité n'est pas habituelle pour le sable saturé. Étant donné que ces levés se retrouvent directement sur le site d'enfouissement, ces anomalies sont attribuées à la présence de lixiviat, plus conducteur que l'eau souterraine environnante. Les profils et le CPT *G22U0901C* indiquent la présence d'une dernière couche constituée de sable silteux avec des résistivités allant de 30 à 200 ohm-m, alors que le CPT montre plutôt des valeurs allant de 120 à 210 ohm-m. Ces valeurs sont aussi plus faibles de ce que l'on pourrait s'attendre. Les

profils de tomographie électrique et les CPT montrent donc des anomalies conductrices très marquées qui ne sont pas dues à la composition du sol. Ils se situent directement sur le site d'enfouissement sanitaire où est plus que probable de retrouver des eaux de lixiviation. Pourtant, l'extension latérale de cette conductivité anormale ne se retrouve dans aucun autre profil sur le site d'étude. Les explications sont soit que l'atténuation du lixiviat est très rapide, soit il se retrouve dans la couche à la base du till où il devient impossible de le détecter par imagerie électrique. De plus, il est possible de constater que le profil *Site 3* est déjà moins conducteur que les profils *Site 1*, *Site 2* et *P11*. Finalement, le profil *Site 4* diffère totalement des autres de son groupe par sa résistivité extrême (800 à 10 000 ohm-m). Il existe une tranchée entre les profils *Site 3* et *Site 4*. La raison exacte d'une si haute résistivité demeure inconnue. Il est possible que cette section soit très bien drainée, ce qui expliquerait les valeurs élevées.

5 Conclusion

Ce mémoire représente la première étape dans un programme de caractérisation d'un aquifère avec une approche intégrée dans le but de déterminer l'écoulement d'eaux de lixiviation ainsi que son l'atténuation naturelle autour d'un site d'enfouissement sanitaire.

La nouvelle approche de caractérisation développée durant ce projet s'est avérée très prometteuse en termes de coûts et de connaissances. Premièrement, elle permet de déterminer l'emplacement optimal des puits qui est l'opération la plus coûteuse. Contrairement à l'approche conventionnelle basée uniquement sur la connaissance géologique et les restrictions d'accès, les puits sont installés dans les endroits montrant la plus grande variabilité en termes de propriétés physiques. Ceci maximise la connaissance de l'hétérogénéité du système aquifère. Cette méthode de caractérisation novatrice aide donc à obtenir une meilleure compréhension de l'hétérogénéité spatiale hydraulique à haute résolution en 3D comparativement à une approche tra-

ditionnelle plus coûteuse.

Le deuxième aspect traité dans ce projet a porté sur l'intégration de données mesurées par plusieurs méthodes géophysiques pour définir la géométrie de l'aquifère, l'étendue du panache de lixiviat. L'analyse conjointe en 3D des mesures indirectes géophysiques (CPT, géoradar et tomographie électrique) sont la principale nouveauté de ce projet. L'utilisation de cette méthodologie novatrice a permis d'obtenir de l'information plus détaillée à un coût moindre comparativement aux méthodes conventionnelles sur la structure interne d'un aquifère. Les différents types de levés permettent un complément d'information qui a rendu possible la caractérisation du panache de lixiviat, restreint au site d'enfouissement, et identifie la variabilité de la structure de l'aquifère. Le logiciel *Gocad* a servi de plateforme 3D pour construire le modèle hydrogéophysique. Ce dernier permet une intégration globale facile et rapide des données donnant, permettant une meilleure compréhension du système aquifère. Le comportement stratigraphique complexe est visible directement, facilitant d'autant plus sa compréhension et l'interaction avec les différents intervenants du projet provenant de différentes disciplines (géologie, géophysique, hydrogéologie, géochimie, géostatistique). L'information géophysique a permis l'interprétation de l'information corrélant avec des forages et, ainsi, propager cette connaissance en 3D en croisant l'information géophysique de surface. Le modèle a aussi permis de relier des structures visibles sur plusieurs images provenant des profils 2D. Ceci a permis de générer des surfaces

3D comme, par exemple, la surface de la base de l'aquifère. De plus, il est maintenant possible de mieux comprendre le modèle stratigraphique et de contraindre la géologie du site. Aussi, il a été possible de définir l'hydrostratigraphie du site par sa résistivité électrique. Globalement, la correspondance entre les profils d'imagerie électrique et les CPT est remarquable sur tout le site d'étude. Des structures ayant des résistivités semblables ont pu être discriminées dans le but caractériser l'hydrostratigraphie du site par l'analyse conjointe des CPT, des profils radars et des profils de tomographie électrique. Ces résultats seront utilisés par Daniel Paradis et Paolo Ruggeri tous deux étudiants au doctorat. Le premier utilisera cette information afin de propager l'information hydraulique de haute résolution acquise par des méthodes non conventionnelles développées par Daniel Paradis. Paolo Russeri, quant à lui partira du modèle stratigraphique afin de mieux contraindre les inversions électriques et d'interpoler un modèle géo-électrique 3D.

Les profils électriques montrent une conductivité plus élevée sur le site d'enfouissement témoignant de la présence de lixiviat dans le sol, mais, les profils électriques situés directement à l'extérieur du site d'enfouissement présentent une chute brutale de la conductivité validant l'hypothèse de l'atténuation naturelle forte ou de l'écoulement dans les couches les plus profondes du lixiviat. L'information électrique et stratigraphique des CPT semble quand même suggérer une légère augmentation de la conductivité électrique (et donc de la proportion de lixiviat en solution) dans la zone située au sud-ouest du

site d'enfouissement sanitaire. Des échantillons de l'eau souterraine sont actuellement analysés pour tenter de comprendre ce phénomène.

La géophysique permet de faire ressortir les anomalies et de définir la stratigraphie, mais possède une résolution limitée. Son principe utilise les contrastes de propriétés physiques des couches géologiques pour donner de l'information. Ainsi, pour obtenir de bons résultats, il faut que la sous-surface possède un bon contraste. Les résultats sont aussi assez décevants lorsque le milieu est trop résistif, puisque le signal électrique ne pénètre plus. En revanche, dans les sols résistants, le signal géoradar, ainsi que d'autres méthodes mesurant la conductivité peuvent être utilisées avec succès (TDEM, induction EM). Cette méthodologie devient un complément important aux méthodes conventionnelles, mais ne les remplacera jamais. Elle permet d'extrapoler des valeurs ponctuelle (obtenue par forage) sur d'importante distance en associant les résultats obtenus par méthodes conventionnelles aux profils géophysiques. De plus, l'observation d'eaux de lixiviation n'a été possible que sur le site. Il est encore impossible de savoir si ce résultat représente réellement la distribution du lixiviat ou la précision de la méthode est trop faible pour réellement prendre en compte la présence de celui-ci en plus faible quantité ailleurs sur le site d'étude.

Bibliographie

- [American Society for Testing and Materials, 2000] American Society for Testing and Materials (2000). Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. *Annual book of ASTM standards*. D5578-95 (Reapproved 2000).
- [Annan, 2005] Annan, A. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics*, chapter 11. Society of Exploration Geophysicists.
- [Beckie and Harvey, 2002] Beckie, R. and Harvey, C. (2002). What does a slug test measure : An investigation of instrument response and the effects of heterogeneity. *Water Resources Research*, 38(12) :1290.
- [Blouin et al., 2009] Blouin, M., Martel, R., Gloaguen, E., and Lamarche, L. (2009). Heterogeneity definition of a deltaic aquifer using multiple-point statistics. In *Geo Halifax 2009*, Edmonton, Canada. 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH.
- [Bolduc, 2003] Bolduc, A. (2003). Géologie des formations superficielles. Commission Géologique du Canada, Dossier public 1976, Charny, Québec. échelle 1/50000.
- [Butler, 2005] Butler, D. (2005). *Near surface Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA.
- [Butler, 1998] Butler, J. (1998). *The design, performance, and analysis of slug tests*. CRC.
- [Butler Jr, 2005] Butler Jr, J. (2005). Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity. *Hydrogeophysics*, pages 23–58.

- [Butler Jr et al., 2002] Butler Jr, J., Healey, J., McCall, G., Garnett, E., and Loheide II, S. (2002). Hydraulic tests with direct-push equipment. *Ground Water*, 40(1) :25–36.
- [Butler Jr et al., 1999] Butler Jr, J., Healey, J., Zheng, L., McCall, W., and Schulmeister, M. (1999). Hydrostratigraphic characterization of unconsolidated alluvial deposits with direct-push sensor technology. *Kansas Geological Survey Open-File Report*, 99(40) :30.
- [Butler Jr and Liu, 1993] Butler Jr, J. and Liu, W. (1993). Pumping tests in nonuniform aquifers : The radially asymmetric case. *Water Resources Research*, 29(2) :259—269.
- [Bélanger et al., 2009] Bélanger, C., Gloaguen, E., Lefebvre, R., Giroux, B., Paradis, D., Ballard, J., and Tremblay, L. (2009). Hydrogeophysical characterization of an unconfined aquifer at the sub-watershed scale. In *Geo Halifax 2009*, Edmonton, Canada. 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH.
- [Chapuis, 1999] Chapuis, R. (1999). *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*. Québec, Ministère de l’environnement.
- [CIMA, 1989] CIMA (1989). Caratérisation des eaux de lixiviation. Technical report, Comité Intermunicipal d’enfouissement sanitaire.
- [Consultants H.G.E. Inc, 1998] Consultants H.G.E. Inc (1998). Rapport d’exécution. Technical report, Construction B.M.L.
- [Daniels, 2005] Daniels, D. J. (2005). *Ground Penetrating Radar*. John Wiley & Sons, Inc.
- [De Marsily et al., 2005] De Marsily, G., Delay, F., Goncalves, J., Renard, P., Teles, V., and Violette, S. (2005). Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, 13(1) :161–183.
- [deGroot Hedlin and Constable, 1990] deGroot Hedlin, C. and Constable (1990). Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, 55 :1613–1624.
- [Delleur, 2007] Delleur, J. (2007). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.
- [Fellenius and Eslami, 2000] Fellenius, B. and Eslami, A. (2000). Soil profile interpreted from CPTu data. In *Proceedings of the International Conference " Year*, pages 27–30.

- [Fetter, 2001] Fetter, C. (2001). *Applied hydrogeology*. Prentice Hall New Jersey.
- [Gauthier et Guillemette Consultants Inc. et al., 1993a] Gauthier et Guillemette Consultants Inc., Dessau Environnement ltée, and Serrener Consultation Inc (1993a). Bilan et mesures d'intervention au lieu d'enfouissement sanitaire des chutes-de-la-chaudière. Technical report, Comité intermunicipal d'enfouissement sanitaire des Chutes-de-la-Chaudière.
- [Gauthier et Guillemette Consultants Inc. et al., 1993b] Gauthier et Guillemette Consultants Inc., Dessau Environnement ltée, and Serrener Consultation Inc (1993b). Étude hydrogéologique complémentaire du lieu d'enfouissement sanitaire de saint-lambert-de-lauzon. Technical report, Comité intermunicipal d'enfouissement sanitaire des Chutes-de-la-Chaudière.
- [Geomines, 1981] Geomines (1981). Saint-lambert-de-lauzon : Étude hydrogéologique des environs immédiats du lieu d'enfouissement sanitaire. Technical report, Ministère de l'Environnement, Direction de la gestion des déchets et de la restauration. C.T. No 133420, Ref. Géomines : 81117.
- [Gloaguen, 2004] Gloaguen, E. (2004). *Reconstruction des images bidimensionnelles de levés de radar géologique en forage*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal.
- [Groupe Conseil TS, 1992] Groupe Conseil TS (1992). Relevé piézométrique et campagne d'échantillonnage, lieu d'enfouissement sanitaire st-lambert (rapport préliminaire). Technical report, La municipalité de Bernières. N/D 312188.
- [Géoroche, 1985] Géoroche (1985). Étude hydrogéologique - lots p-258 à p-265 st-lambert de lauzon. Technical report, Ministère de l'Environnement, Direction de la récupération et du recyclage. N/D 5125-0000-0000, Rapport No 5125-01.
- [Hvorslev, 1951] Hvorslev, M. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations.
- [J. Rings, 2009] J. Rings, C. H. (2009). Reliability of resistivity quantification for shallow subsurface water processes. *Journal of Applied Geophysics*, 68(3) :404 – 416.
- [Kruseman, 1990] Kruseman, G.P. et Ridder, N. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*. Number 47.
- [Landry and Mercier, 1983] Landry, B. and Mercier, M. (1983). *Notion de géologie : avec exemple du Québec*. Modulo, Outremont.

- [Lankston, 1990] Lankston, R. (1990). High-resolution refraction seismic data acquisition and interpretation. *Geotechnical and environmental geophysics*, Vol 1 :45–73.
- [Lefebvre, 2010] Lefebvre, R. (2010). Programme de caractérisation régionale des eaux souterraines. In *4e conférence de l'Association d'Hydrogéophysique du Québec*.
- [Lesmes and Friedman, 2005] Lesmes, D. and Friedman, S. (2005). Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils. *Hydrogeophysics*, pages 87–128.
- [Linde et al., 2006] Linde, N., Binley, A., Tryggvason, A., Pedersen, L., and Revil, A. (2006). Improved hydrogeophysical characterization using joint inversion of cross-hole electrical resistance and ground-penetrating radar traveltime data. *Water Resour. Res.*, 42 :W12404.
- [Loke and Barker, 1996] Loke, M. and Barker, R. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44 :131–152.
- [Mailhot, 1974] Mailhot, M. (1974). Rapport de visite. Technical report, Gouvernement du Québec, Service de protection de l'environnement. Dossier 10-03-18.
- [Meier et al., 1998] Meier, P., Carrera, J., and Sánchez-Vila, X. (1998). An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations. *Water Resources Research*, 34(5) :1011–1025.
- [Melville et al., 1991] Melville, J., Molz, F., Gouven, O., and Widdowson, M. (1991). Multilevel slug tests with comparisons to tracer data. *Ground Water*, 29(6) :897–907.
- [Ministère du Développement Durable, 2002] Ministère du Développement Durable, d. l. e. d. P. (2002). Politique nationale de l'eau.
- [Ouillon et al., 2008] Ouillon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Boutin, A., Blais, V., and Parent, M. (2008). Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada. *Journal of Hydrology*, 351(1-2) :71–86.
- [Paradigm,] Paradigm. Gocad (geological object computer aided design).
- [Paradis et al., 2010a] Paradis, D., Lefebvre, R., Ballard, J., Martin, D., and DeLouis, C. (2010a). Interference tests for in situ measurements of vertical

- hydraulic conductivity. In *63th Canadian Geotechnical Conference and 1st joint CGS/CNC-IPA Permafrost Speciality Conference*, Calgary, Canada.
- [Paradis et al., 2008] Paradis, D., Lefebvre, R., Gloaguen, E., Tremblay, L., Ballard, J., and Morin, R. (2008). Multivariate integration of cptu/smr and hydraulic conductivity measurements for the definition of hydrofacies in unconsolidated sediments. In *Geo Edmonton 2008*, Edmonton, Canada. 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH.
- [Paradis et al., 2009] Paradis, D., Lefebvre, R., Morin, R., and Gloaguen, E. (2009). Using borehole flowmeter data to optimize hydraulic conductivity characterization in heterogeneous unconsolidated aquifers. In *Geo Halifax 2009*, Edmonton, Canada. 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH.
- [Paradis et al., 2010b] Paradis, D., Lefebvre, R., Morin, R., and Gloaguen, E. (2010b). Permeability profiles in granular aquifers using flowmeters in direct-push wells.
- [Parriaux, 2009] Parriaux, A. (2009). *Géologie : bases pour l'ingénieur*. PPUR presses polytechniques.
- [Plamondon, 1974] Plamondon, J.-P. (1974). Rapport de visite. Technical report, Gouvernement du Québec, Service de protection de l'environnement. Dossier 10-03-18.
- [Robertson and Campanella, 1983] Robertson, P. and Campanella, R. (1983). Interpretation of cone penetration tests, part i (sand) and part ii (clay). *Soil Mechanics Series, UBC, Civil Eng. Dept.*, (60) :83 pages.
- [Robinson et al., 2005] Robinson, D., Kelleners, T., Cooper, J., Gardner, C., Wilson, P., Lebron, I., and Logsdon, S. (2005). Evaluation of a capacitance probe frequency response model accounting for bulk electrical conductivity : Comparison with TDR and network analyzer measurements. *Vadose Zone Journal*, 4(4) :992.
- [Rochette, 1971] Rochette, F. (1971). Levé hydrogéologique à saint-lambert, comté de lévis. Technical report, Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles. Rapport No 757.
- [Ross and McElwee, 2007] Ross, H. and McElwee, C. (2007). Multi-level slug tests to measure 3-D hydraulic conductivity distributions. *Natural Resources Research*, 16(1) :67–79.
- [Rubin and Hubbard, 2005] Rubin, Y. and Hubbard, S. (2005). *Hydrogeophysics*. Springer Verlag.

- [Régie intermunicipale de gestion des déchets de Chutes-de-la-Chaudière, 2009] Régie intermunicipale de gestion des déchets de Chutes-de-la-Chaudière (2009). <http://www.chaudiere.com/regiedechets/>.
- [Sasaki, 1992] Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40 :453–464.
- [Sellwood et al., 2005] Sellwood, S., Healey, J., Birk, S., and Butler Jr, J. (2005). Direct-push hydrostratigraphic profiling : Coupling electrical logging and slug tests. *Ground water*, 43(1) :19–29.
- [Sheriff and Geldart, 1995] Sheriff, R. and Geldart, L. (1995). *Exploration seismology*. Cambridge Univ. Press Cambridge.
- [Shinn II et al., 1998] Shinn II, J., Timian, D., Morey, R., Mitchell, G., Antle, C., and Hull, R. (1998). Development of a CPT deployed probe for in situ measurement of volumetric soil moisture content and electrical resistivity. *Field Analytical Chemistry & Technology*, 2(2) :103–109.
- [Sánchez-Vila et al., 1999] Sánchez-Vila, X., Meier, P., and Carrera, J. (1999). Pumping tests in heterogeneous aquifers : An analytical study of what can be obtained from their interpretation using Jacob’s method. *Water Resources Research*, 35(4) :943–952.
- [Telford et al., 1990] Telford, W., Telford, W., Geldart, L., and Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge Univ Pr.
- [Tremblay et al., 2008] Tremblay, L., Gloaguen, E., Lefebvre, R., Ballard, J., Paradis, D., and Michaud, Y. (2008). Integration of geophysical, geochemical, and direct push methods for the detection of leachate plumes. In *Geo Edmonton 2008*, Paper 175, pages 1142–1149, Edmonton, Canada. 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH. Poster presentation.
- [Tremblay et al., 2009] Tremblay, L., Lefebvre, R., Gloaguen, E., and Paradis, D. (2009). Integration characterisation of aquifer heterogeneity and landfill leachate plume migration. In *AGU 2009 Joint Assembly*, Paper 1119, Toronto, Ontario. Poster presentation.
- [Wu et al., 2011] Wu, S., Zhou, Q., Wang, G., Yang, L., and Ling, C. (2011). The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content. *Environmental Earth Sciences*, 62 :999–1011. 10.1007/s12665-010-0585-4.
- [Xu, 2010] Xu, G. (2010). *Science of Geodesy : Advances and Future Directions*. Springer.

- [Yeh et al., 1995] Yeh, T., Mas-Pla, J., Williams, T., and McCarthy, J. (1995). Observation and three-dimensional simulation of chloride plumes in a sandy aquifer under forced-gradient conditions. *Water Resources Research*, 31(9) :2141–2157.
- [Zemansky and McElwee, 2005] Zemansky, G. and McElwee, C. (2005). High-resolution slug testing. *Ground water*, 43(2) :222–230.

Annexes

A Profils de géoradar

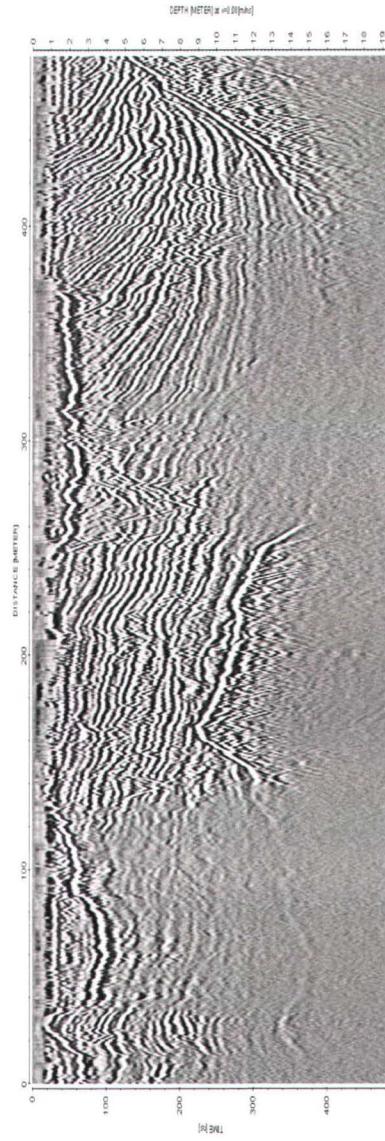


FIGURE A.1 – Profil SL02

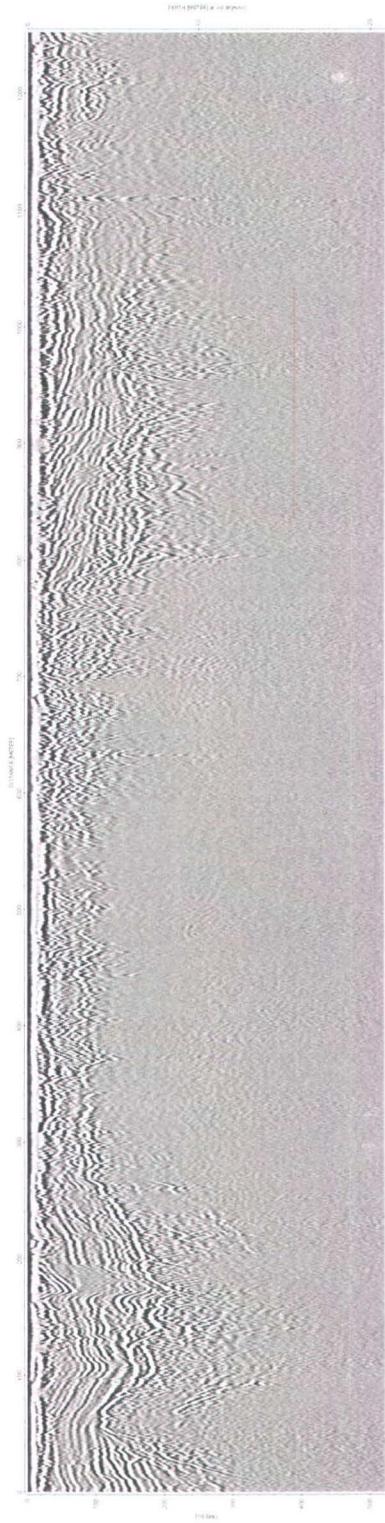


FIGURE A.2 – Profil SL03

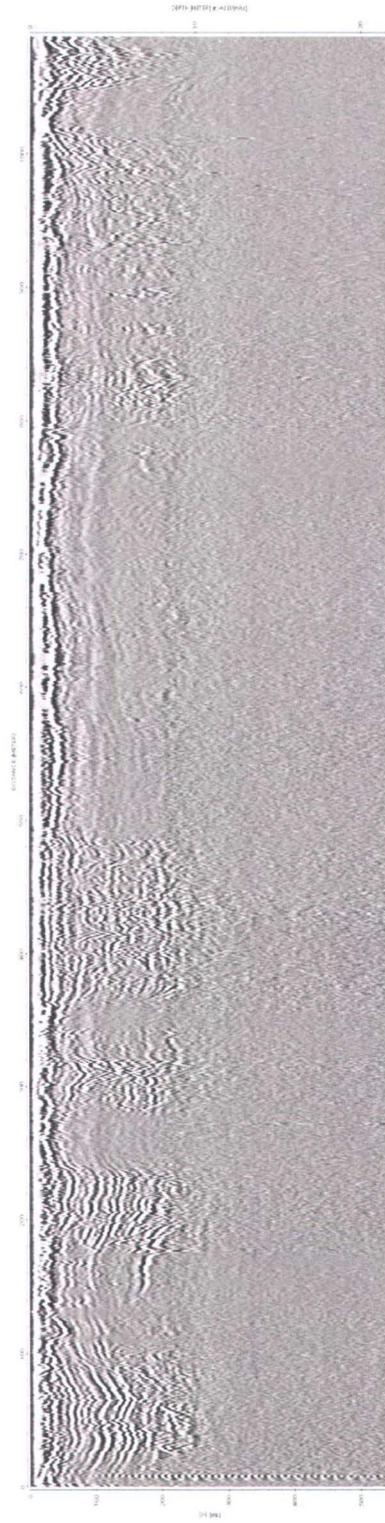


FIGURE A.3 – Profil SL04

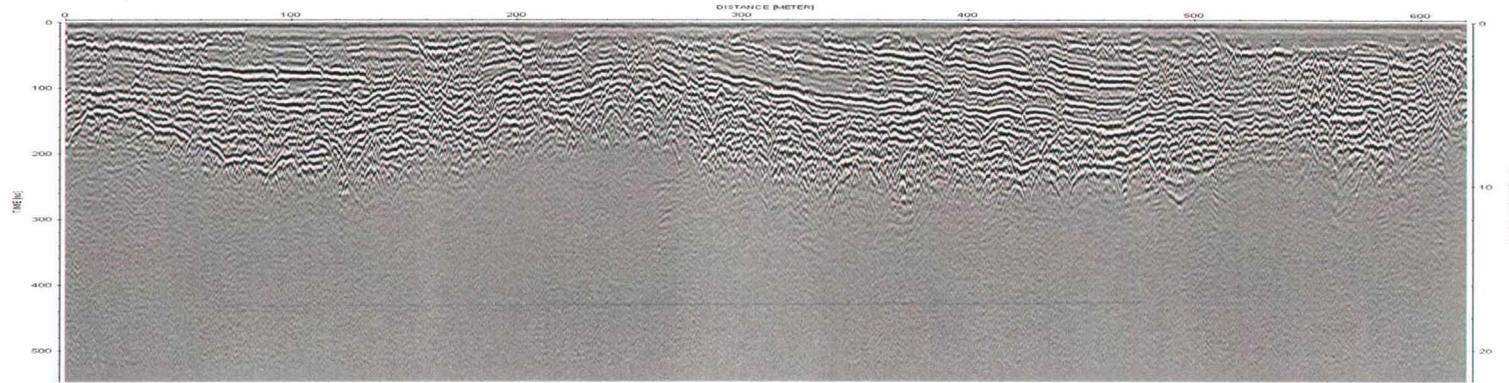


FIGURE A.4 – Profil SL05

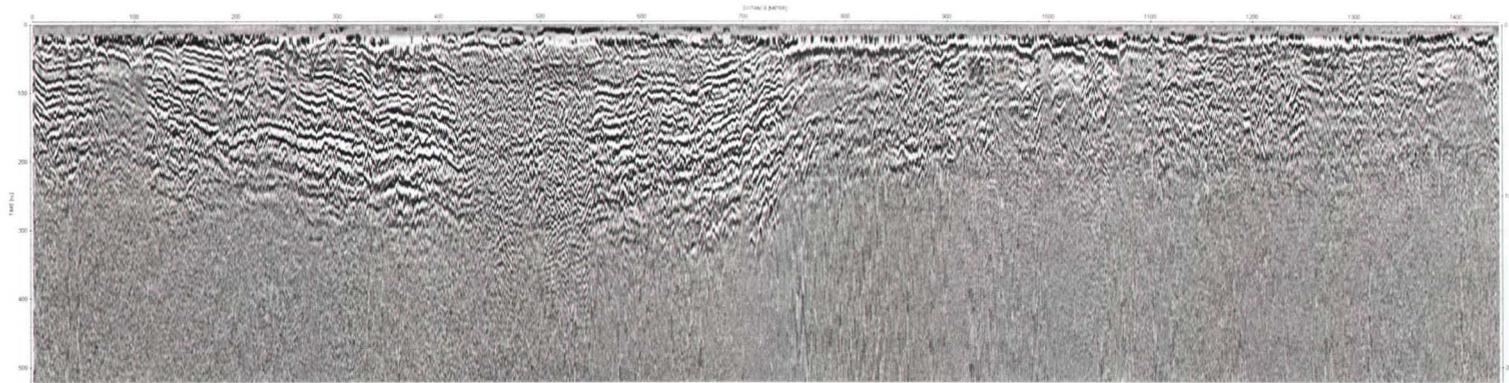


FIGURE A.5 – Profil SL06

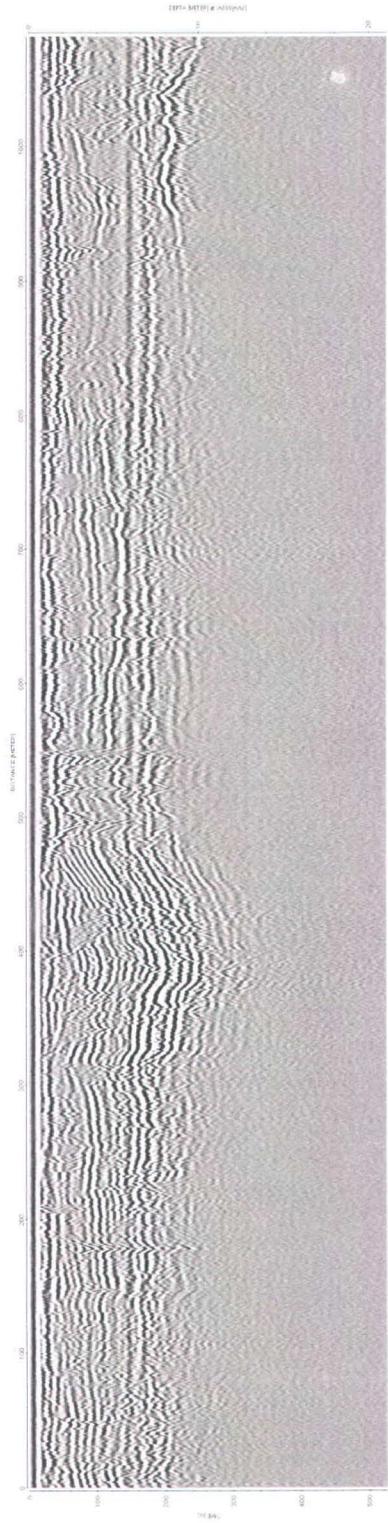


FIGURE A.6 – Profil SL07

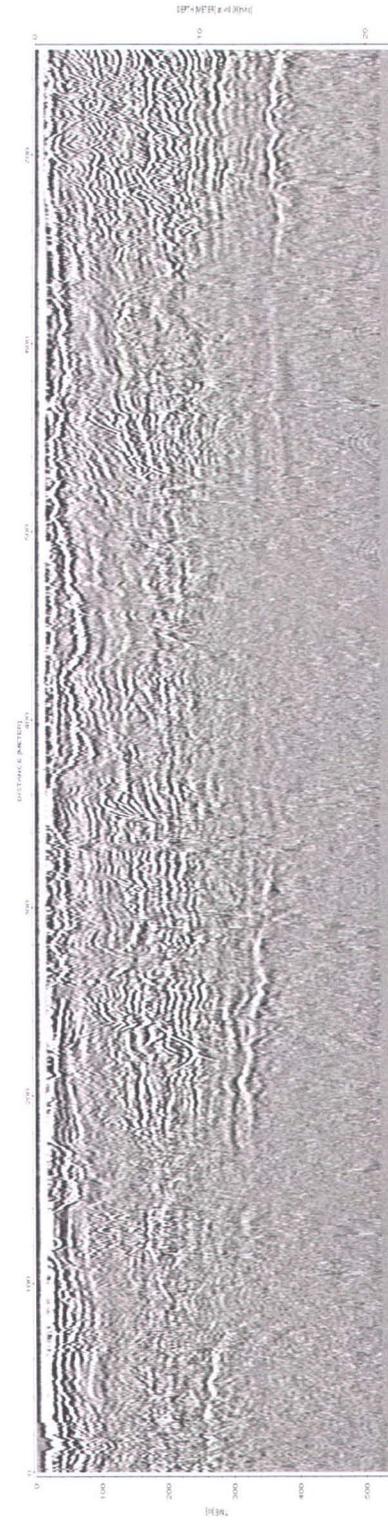


FIGURE A.7 – Profil SL07B

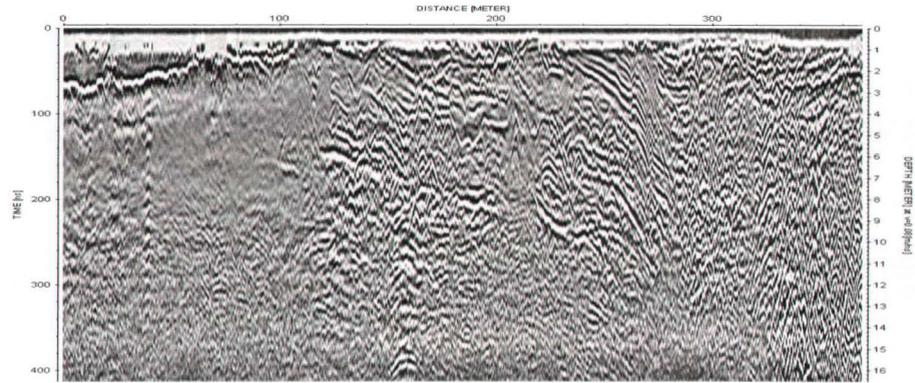


FIGURE A.8 – Profil SL09

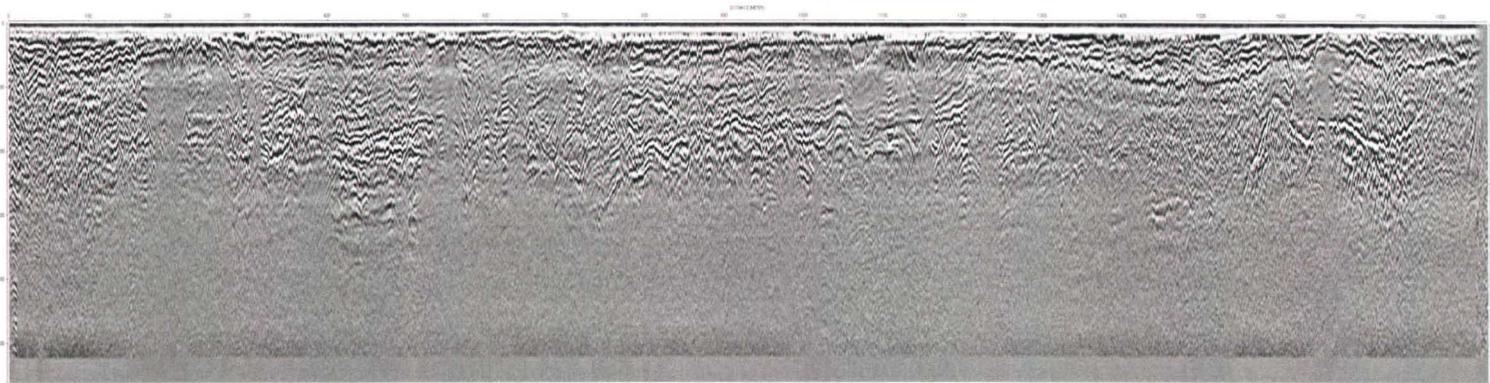


FIGURE A.9 – Profil SL10A

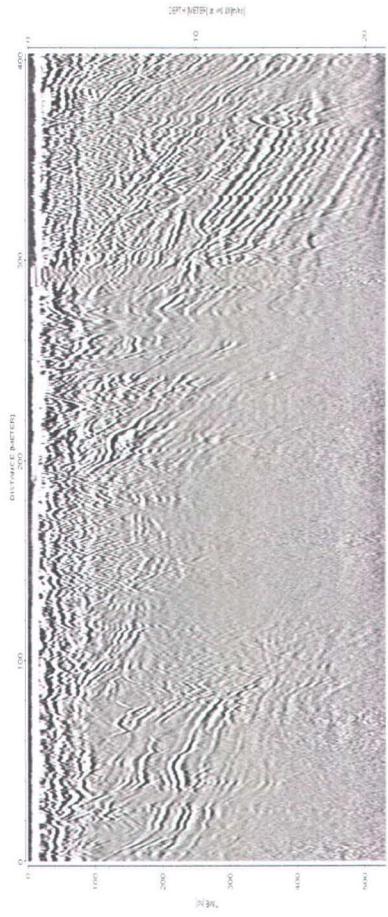


FIGURE A.10 – Profil SL11

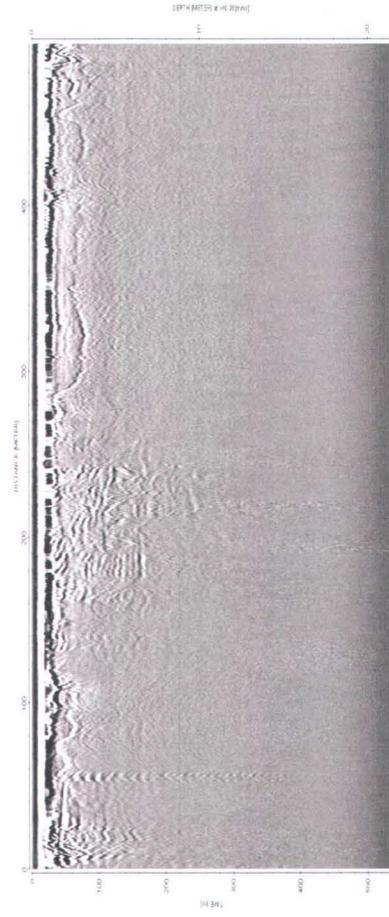


FIGURE A.11 – Profil SL12

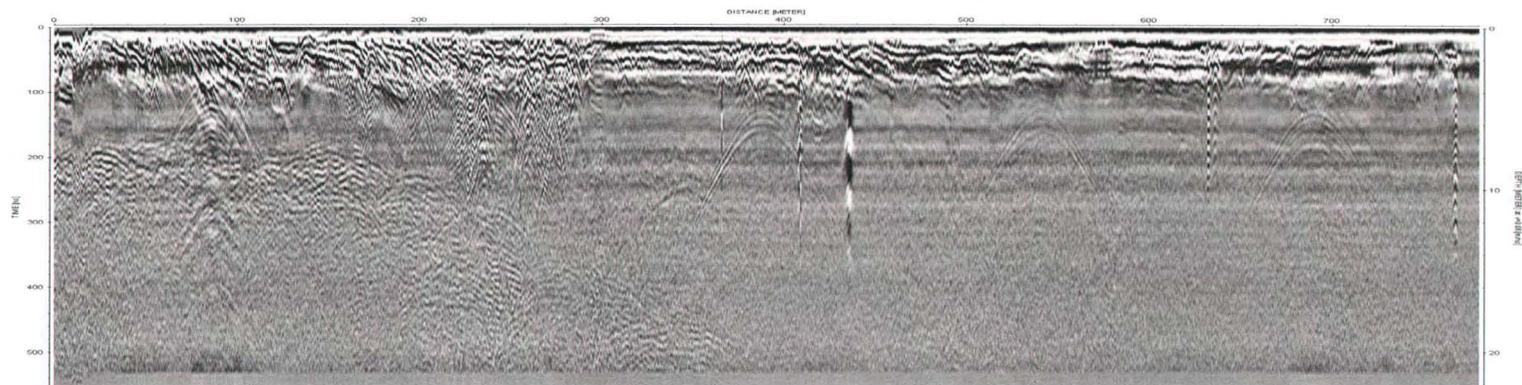


FIGURE A.12 – Profil SL13

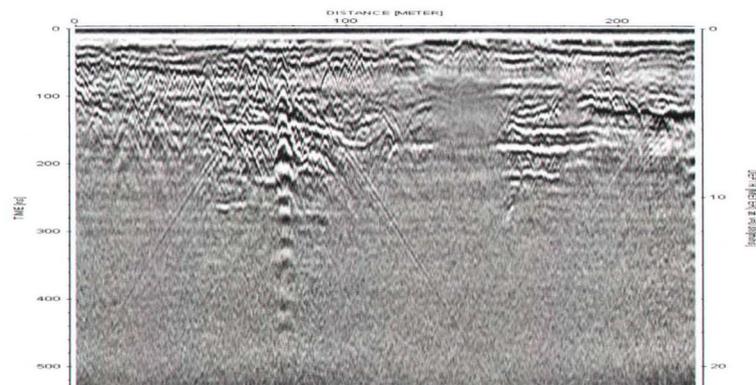


FIGURE A.13 – Profil SL14

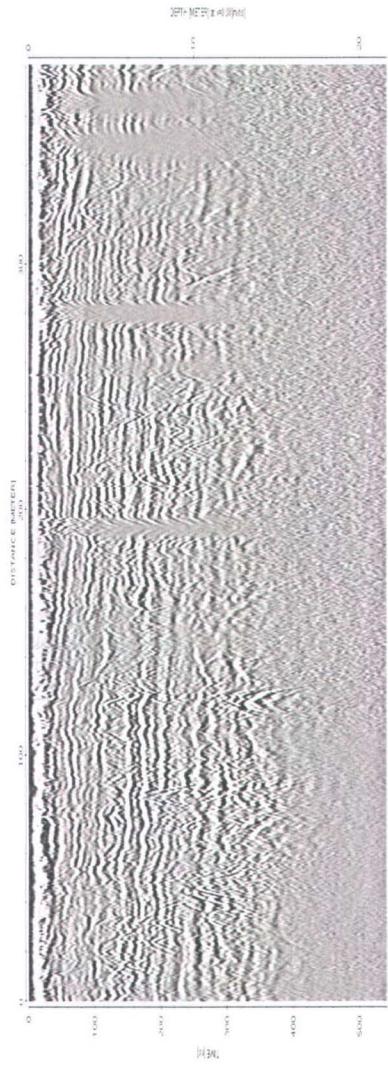


FIGURE A.14 – Profil SL15

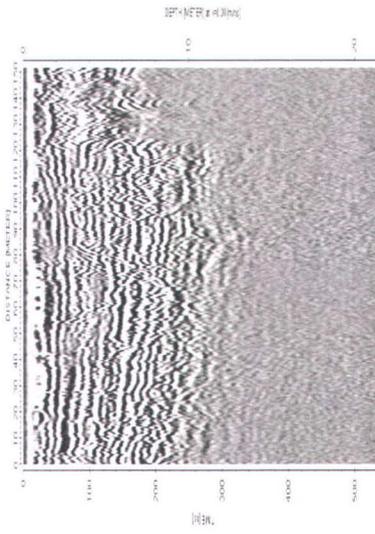


FIGURE A.15 – Profil SL16

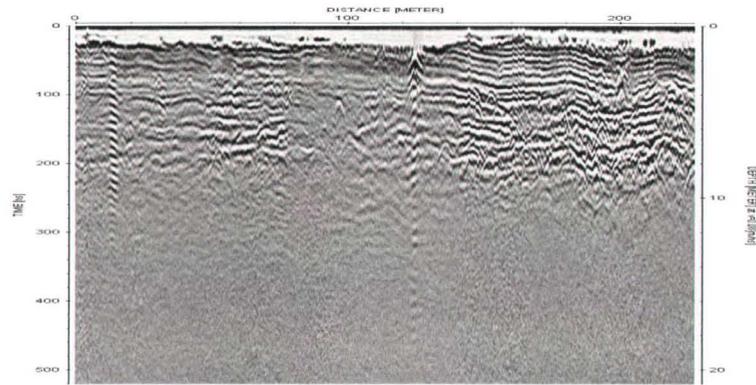


FIGURE A.16 – Profil SL17

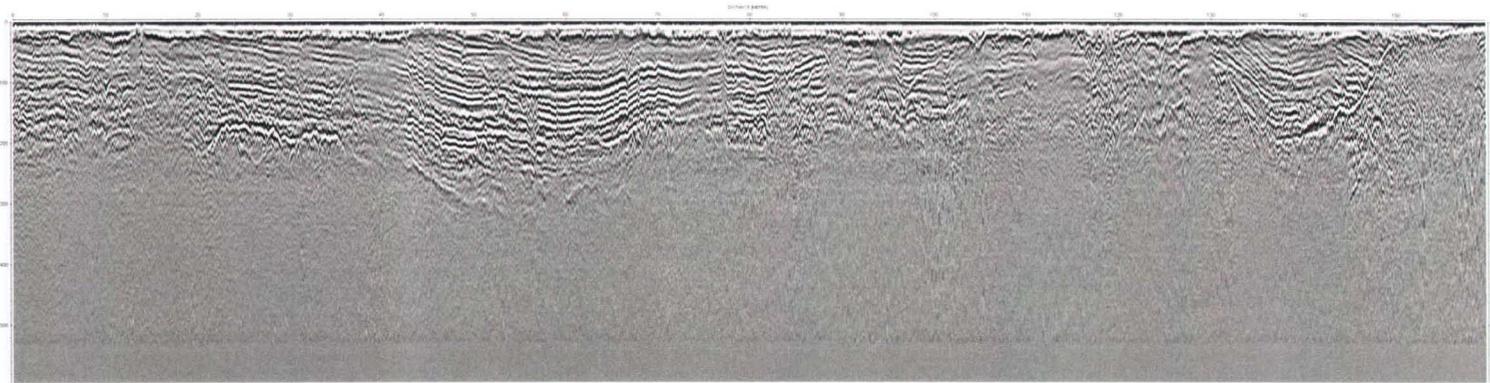


FIGURE A.17 – Profil SL18

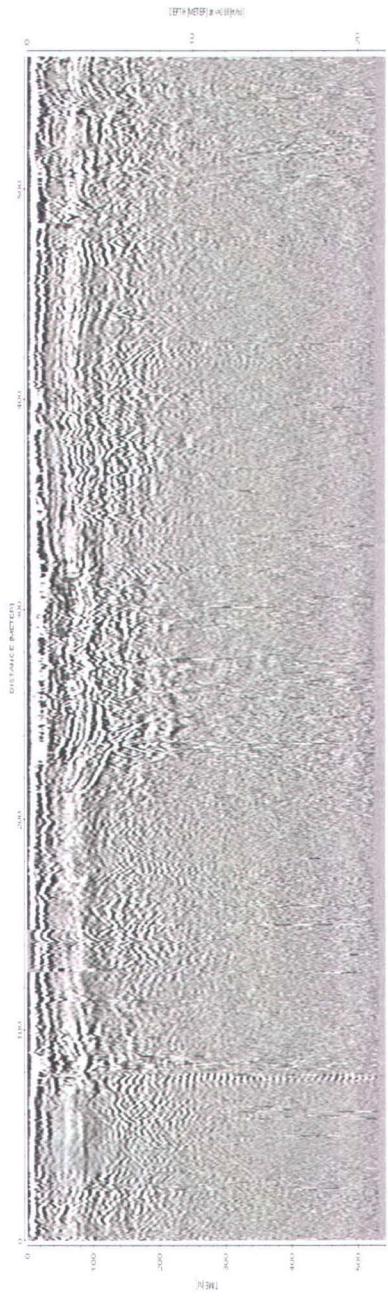


FIGURE A.18 – Profil SL19

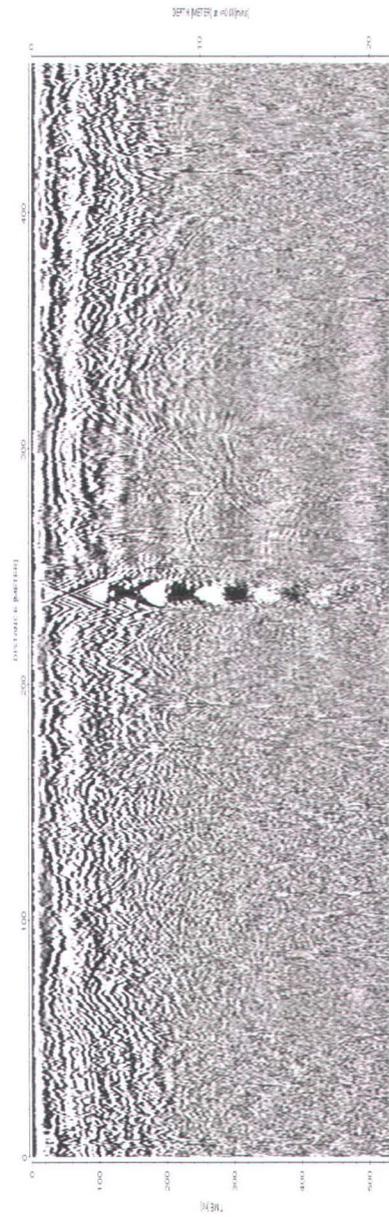


FIGURE A.19 – Profil SL19B

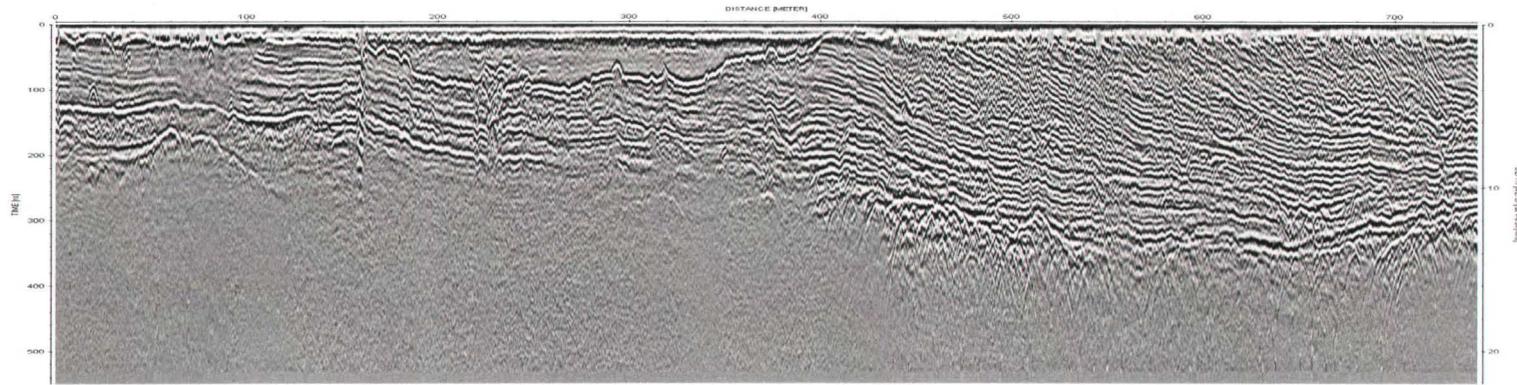


FIGURE A.20 – Profil SL20

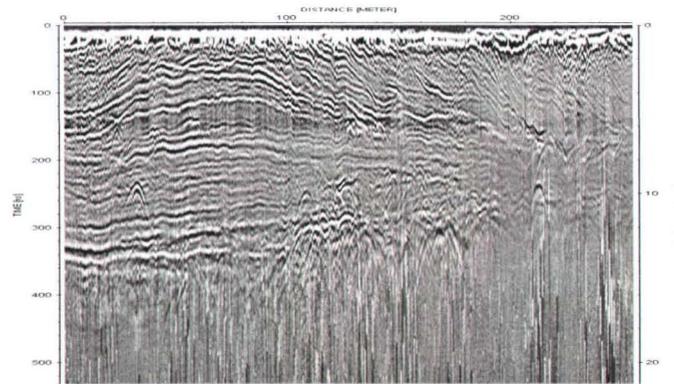


FIGURE A.21 – Profil SL21

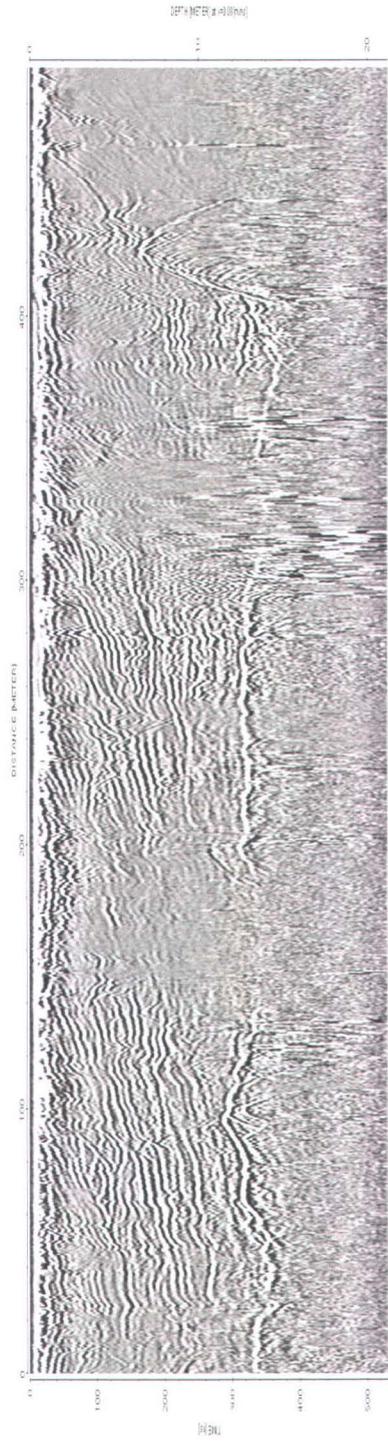


FIGURE A.22 – Profil SL22

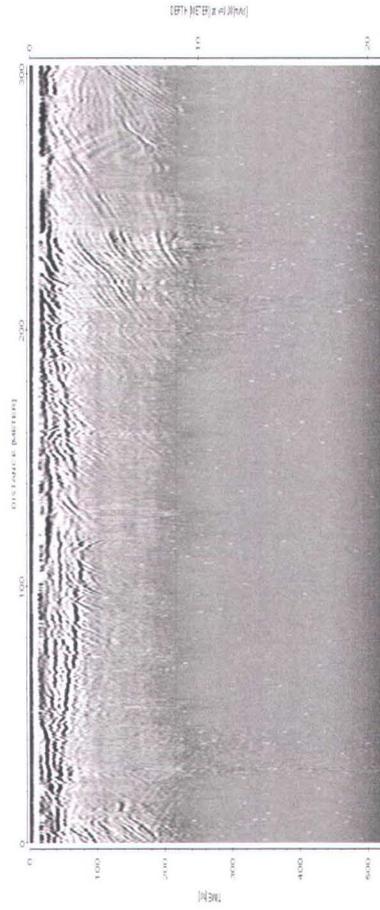


FIGURE A.23 – Profil SL23

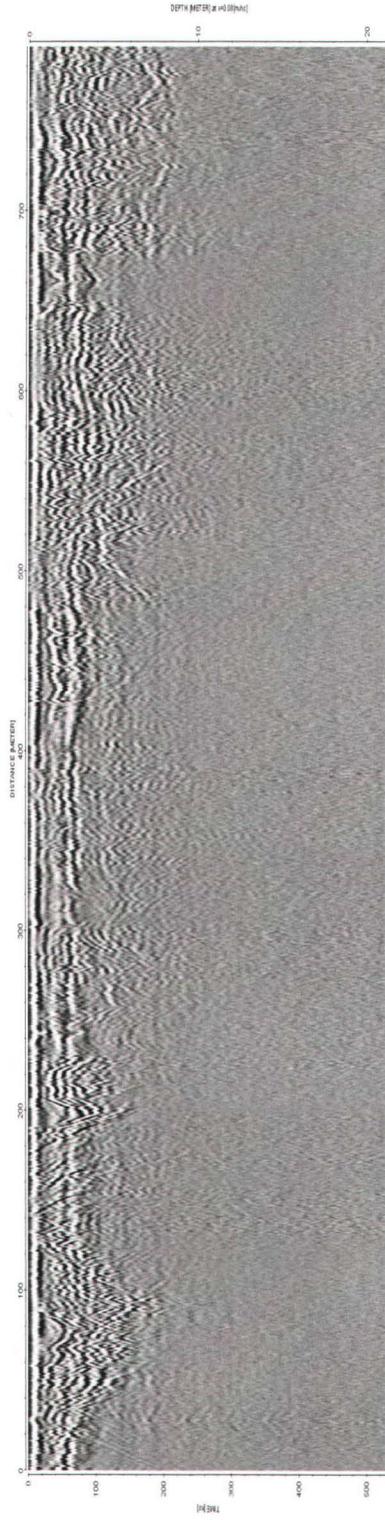


FIGURE A.24 – Profil SL24

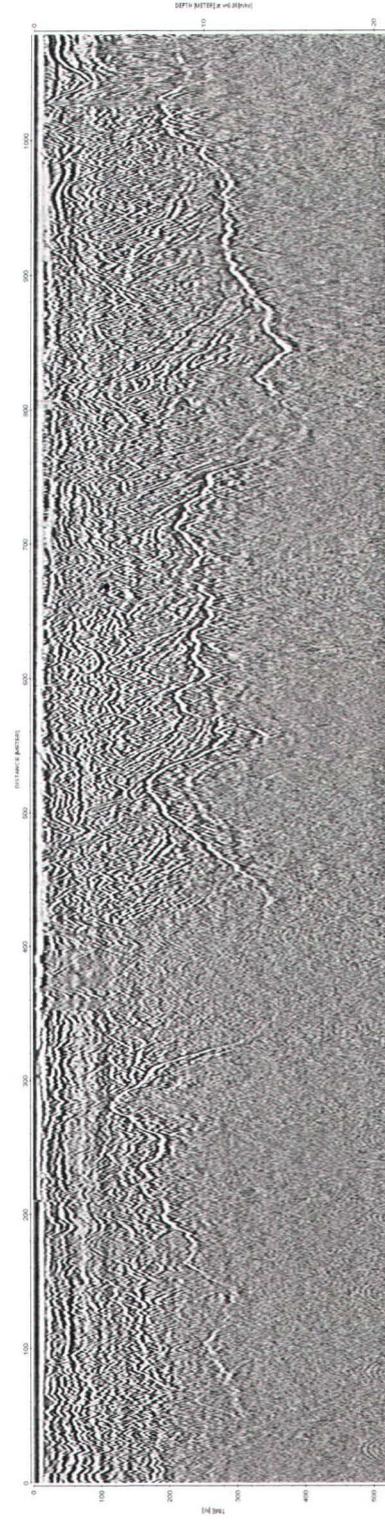


FIGURE A.25 – Profil SL24B

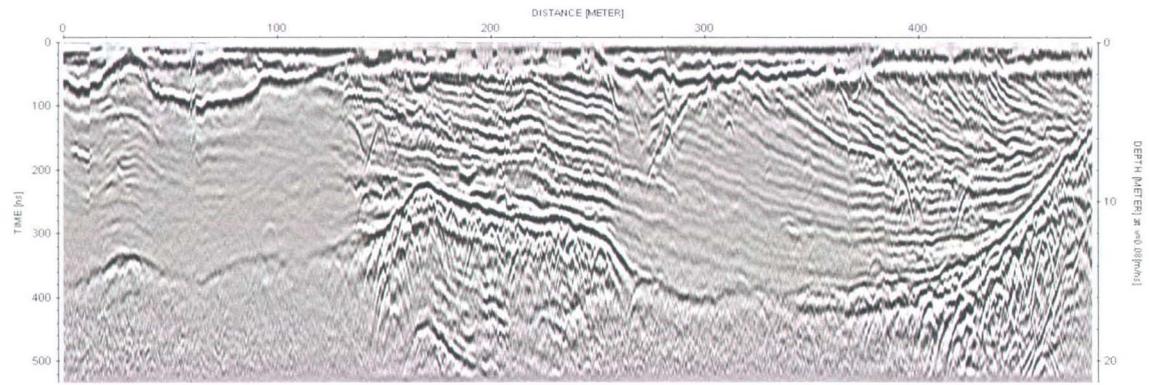


FIGURE A.26 – Profil SL27

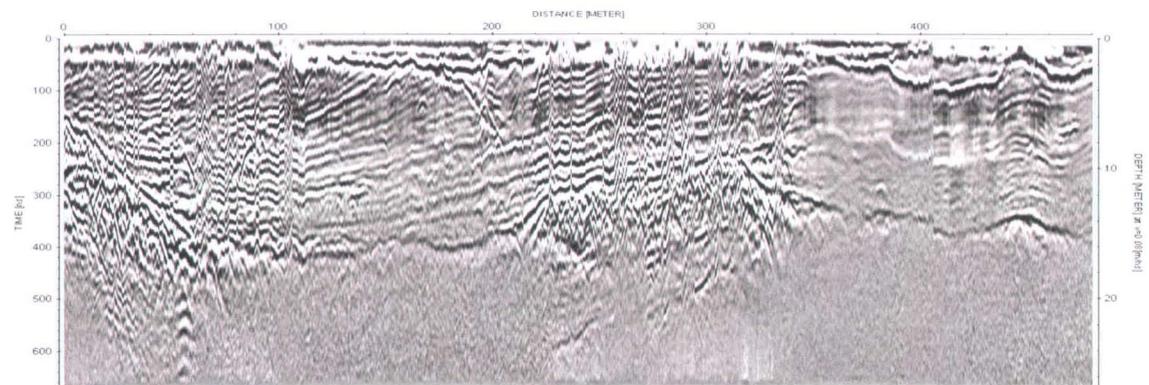


FIGURE A.27 – Profil SL28

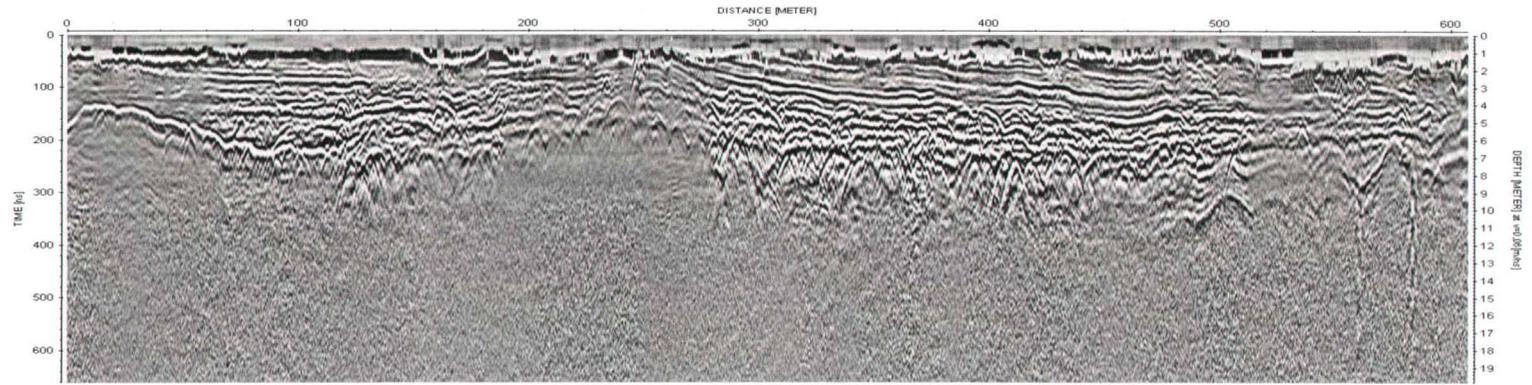


FIGURE A.28 – Profil SL100

116

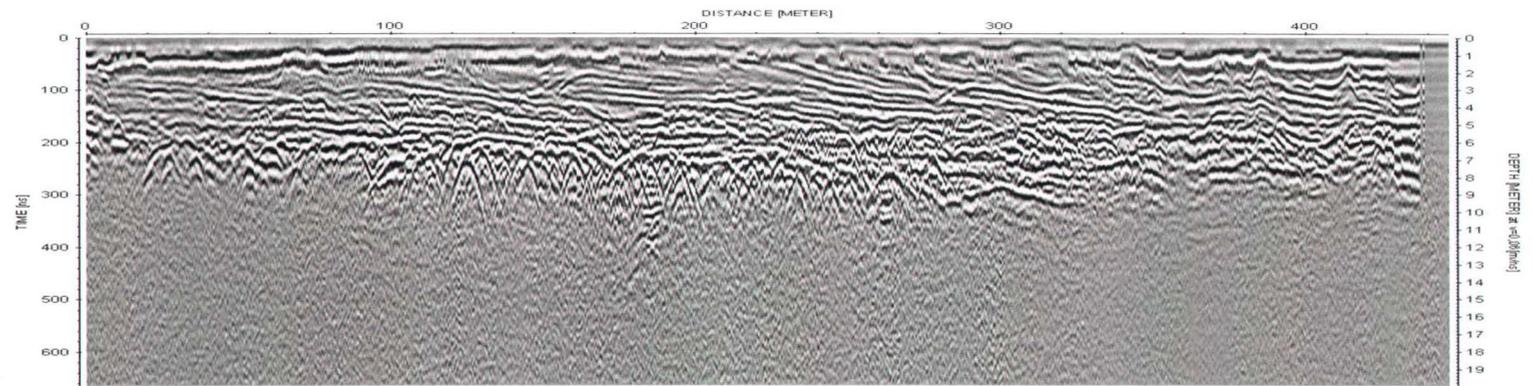


FIGURE A.29 – Profil SL101



FIGURE A.30 – Profil SL102

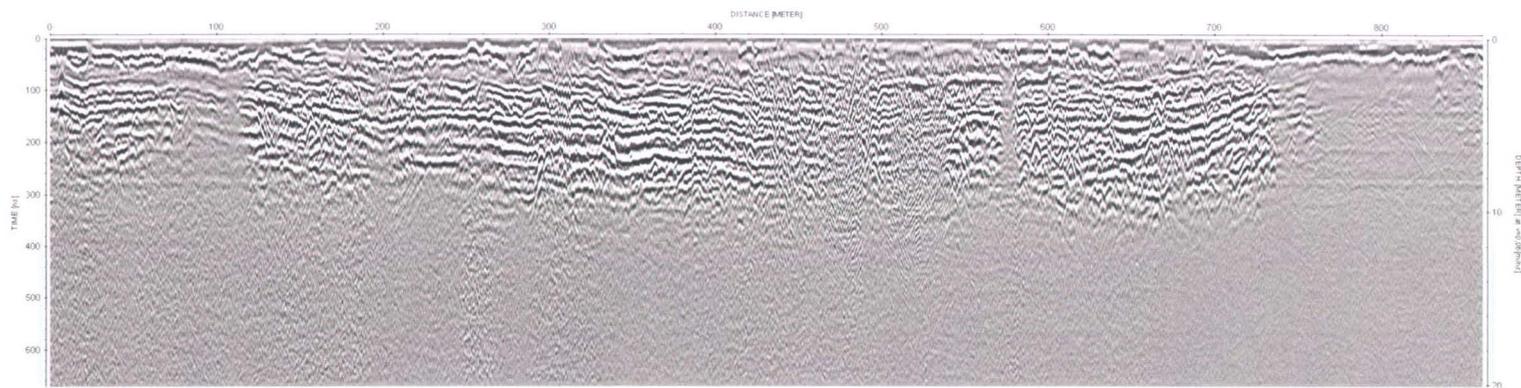


FIGURE A.31 – Profil SL103

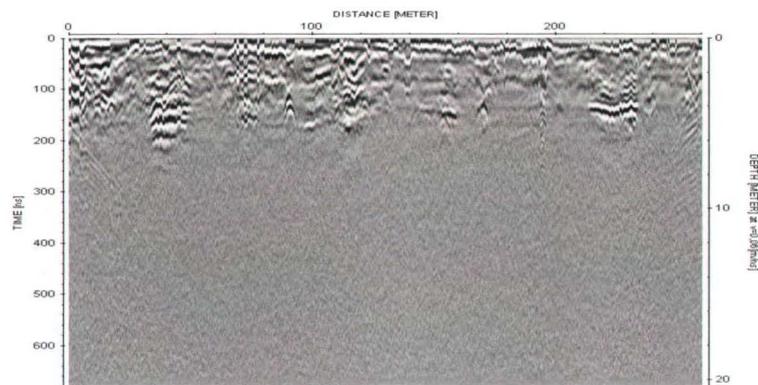


FIGURE A.32 – Profil SL104

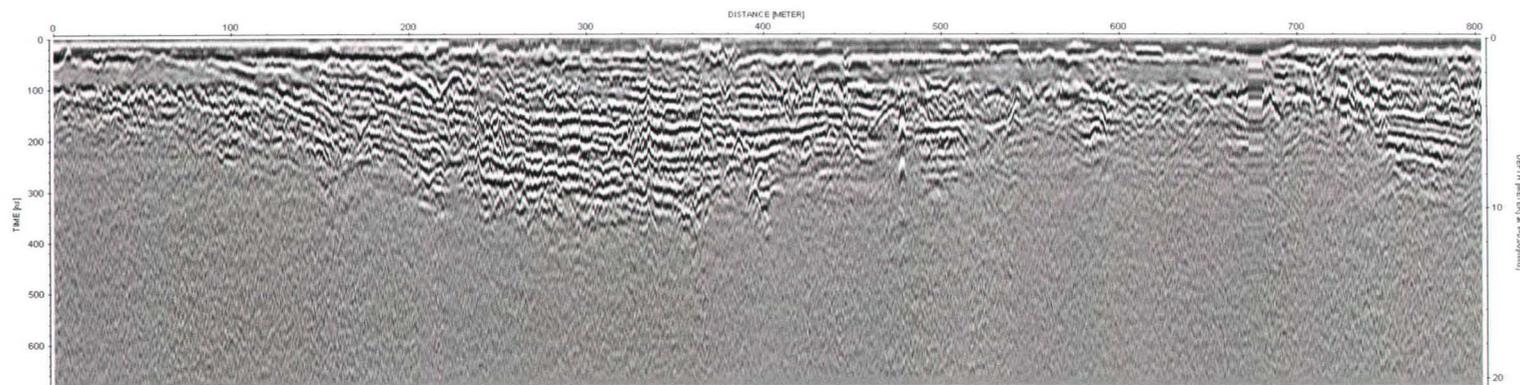


FIGURE A.33 – Profil SL105

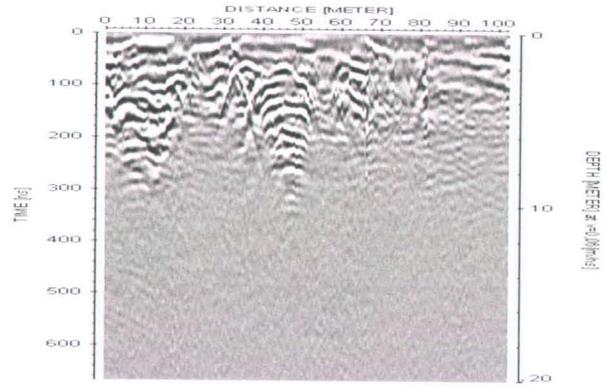


FIGURE A.34 – Profil SL106

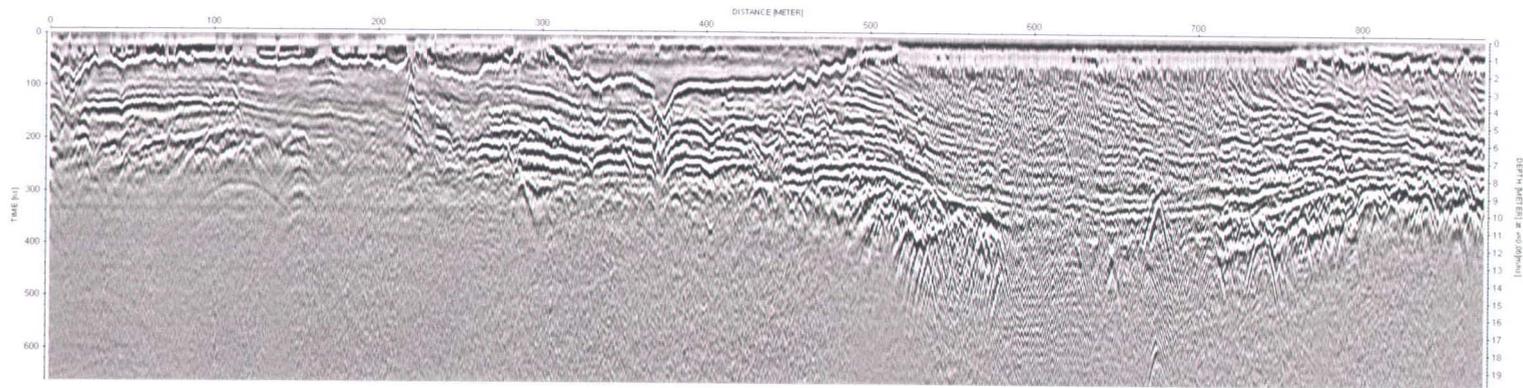


FIGURE A.35 – Profil SL107

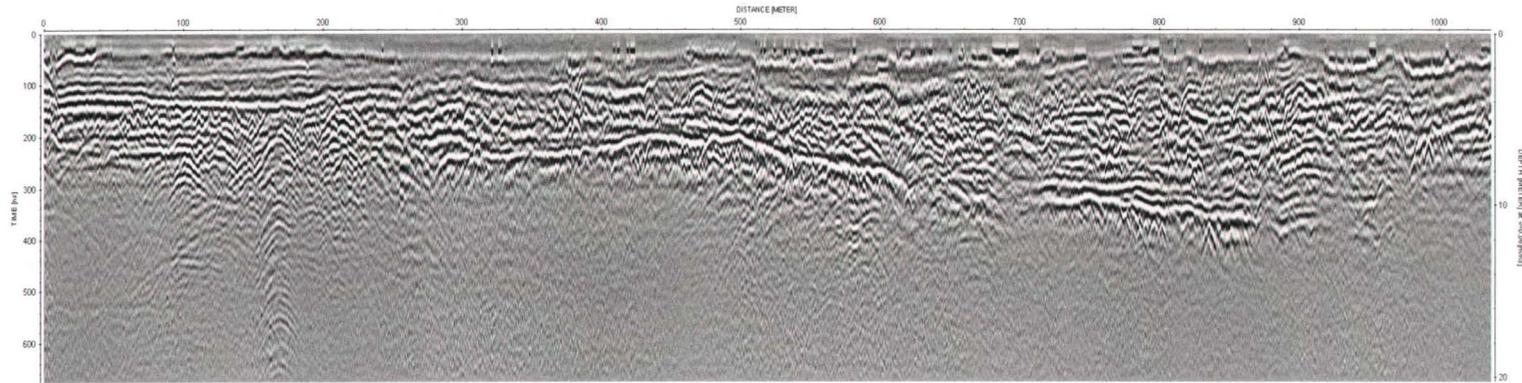


FIGURE A.36 – Profil SL108

120

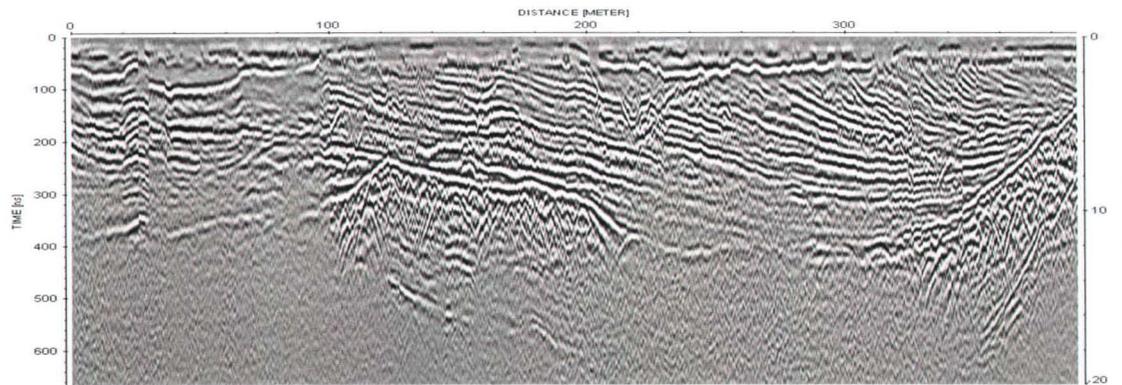


FIGURE A.37 – Profil SL109

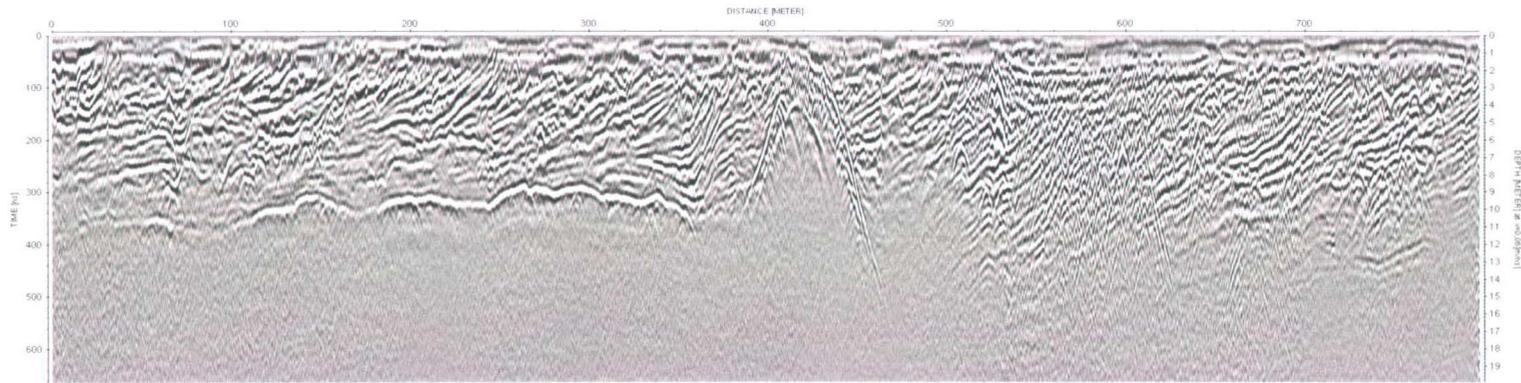


FIGURE A.38 – Profil SL110

121

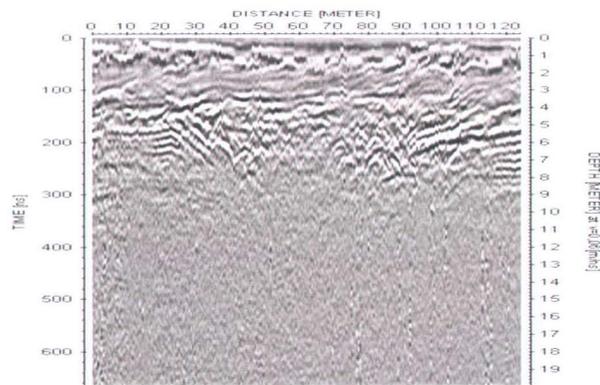


FIGURE A.39 – Profil SL111

B Profils de tomographie électrique

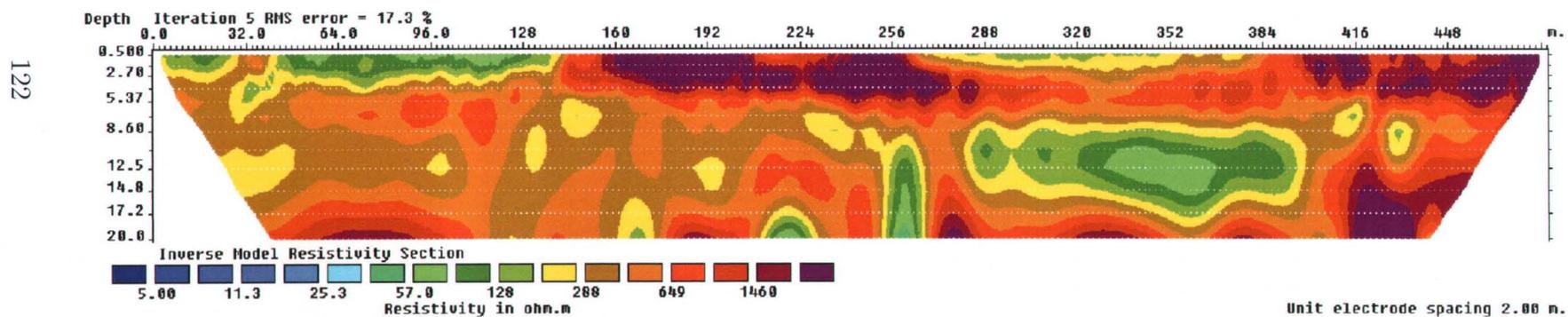


FIGURE B.1 – Profil p1ad

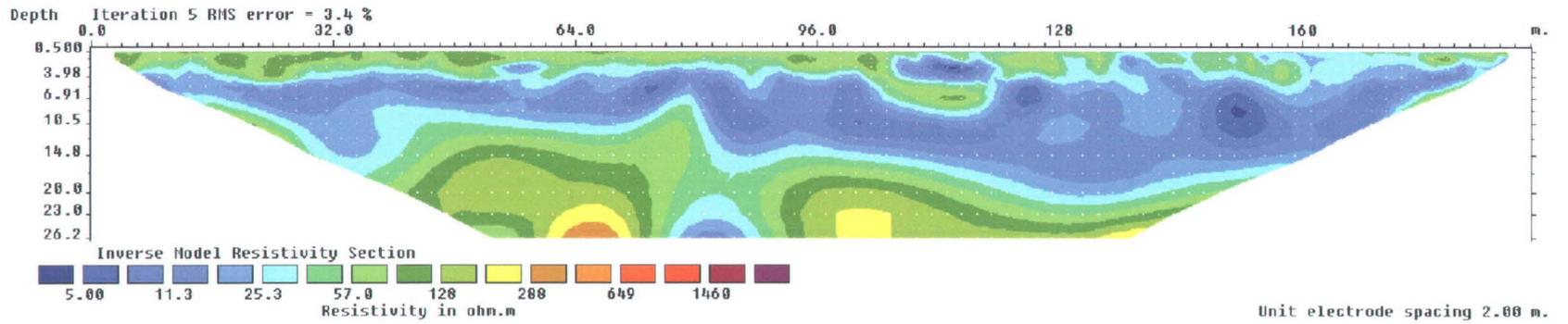


FIGURE B.2 – Profil Site 1

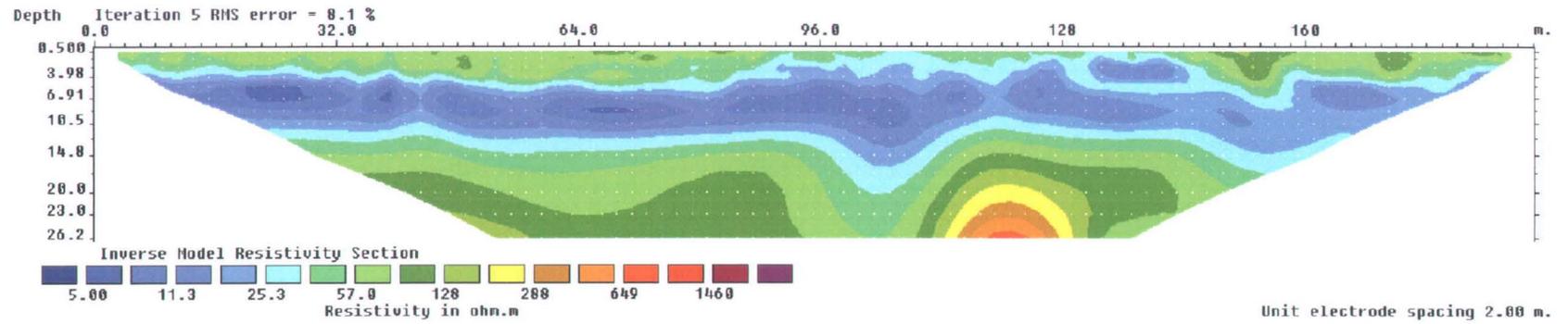


FIGURE B.3 – Profil Site 2

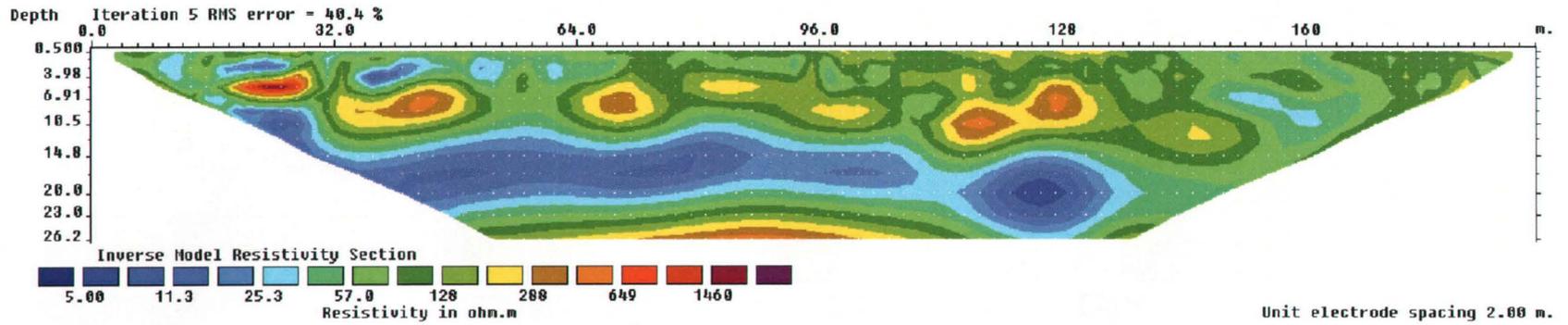


FIGURE B.4 – Profil Site 3

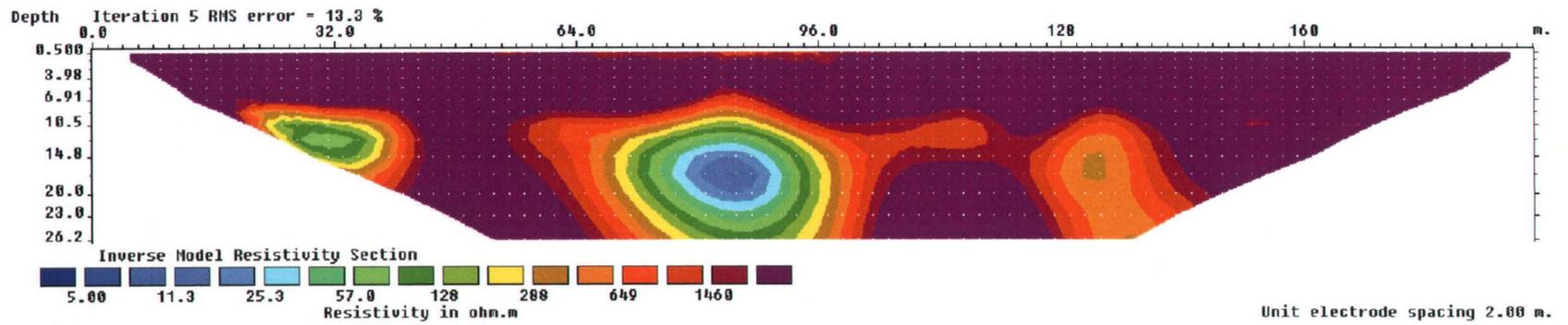


FIGURE B.5 – Profil Site 4

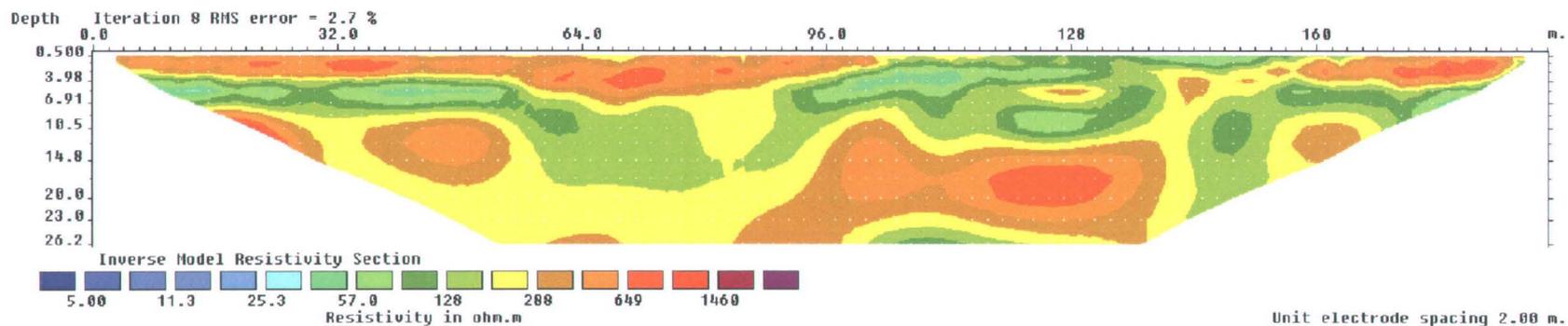


FIGURE B.6 – Profil Champ

125

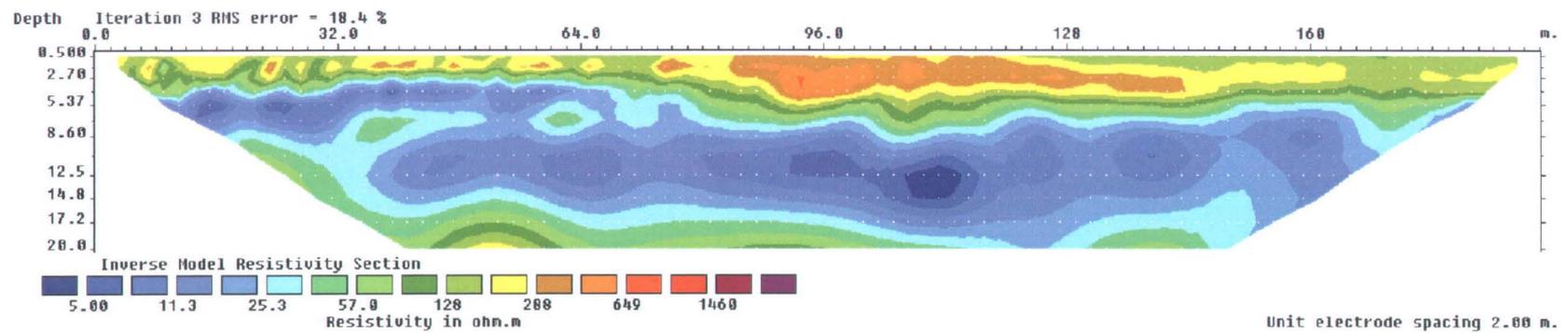


FIGURE B.7 – Profil P11

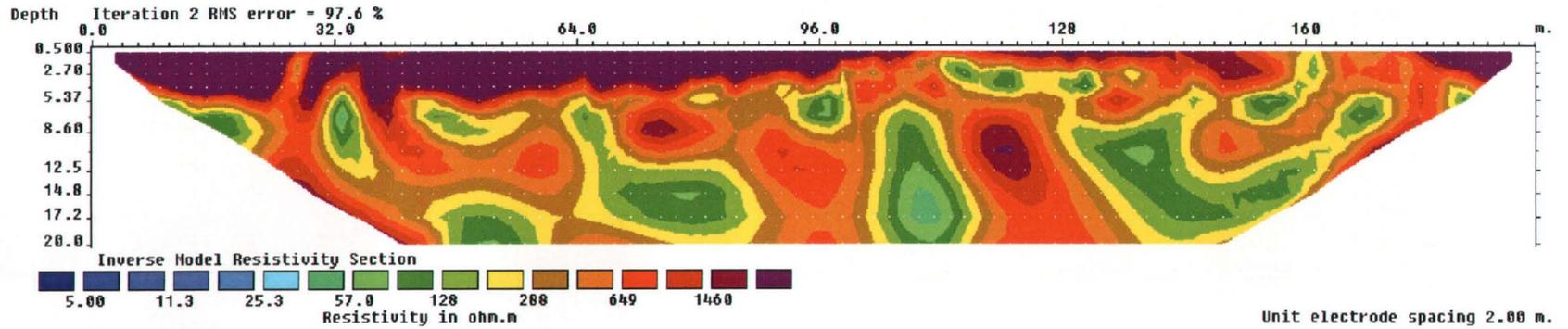


FIGURE B.8 – Profil P4

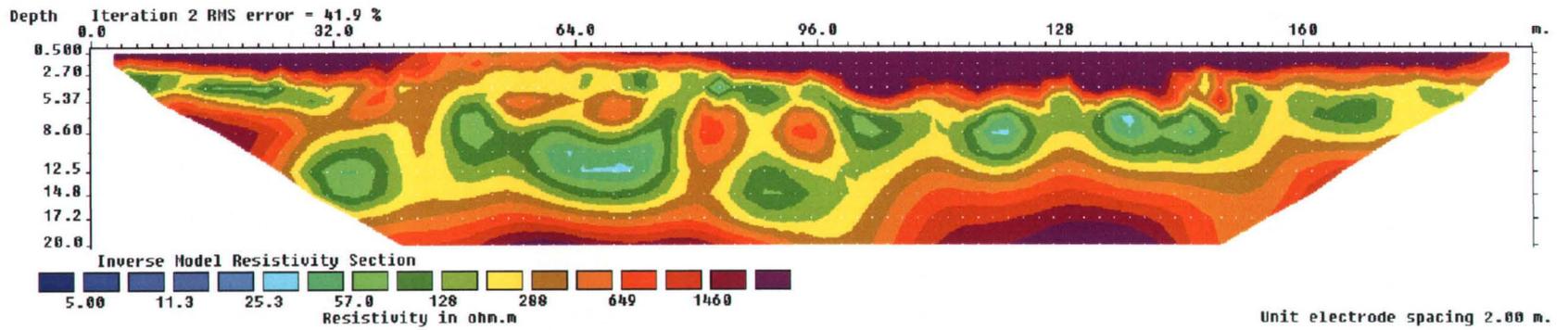


FIGURE B.9 – Profil P14

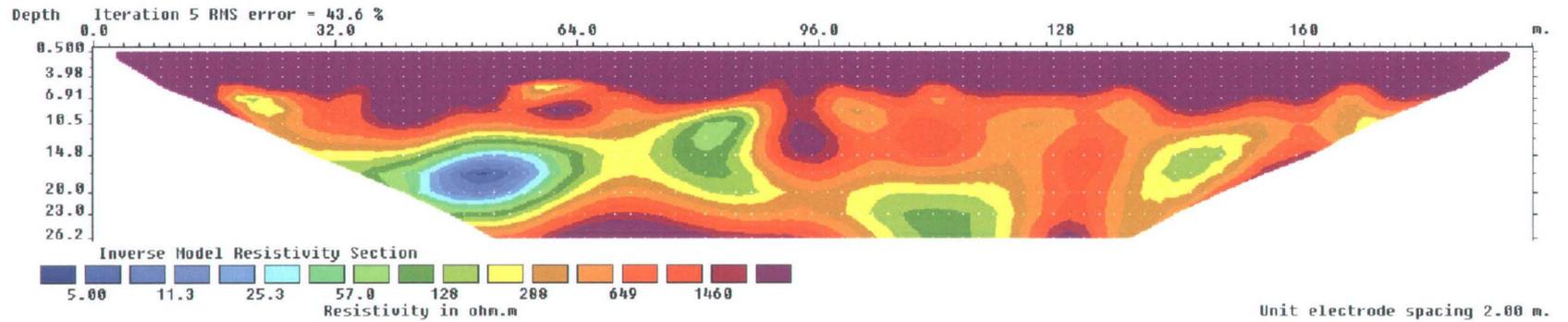


FIGURE B.10 – Profil PER

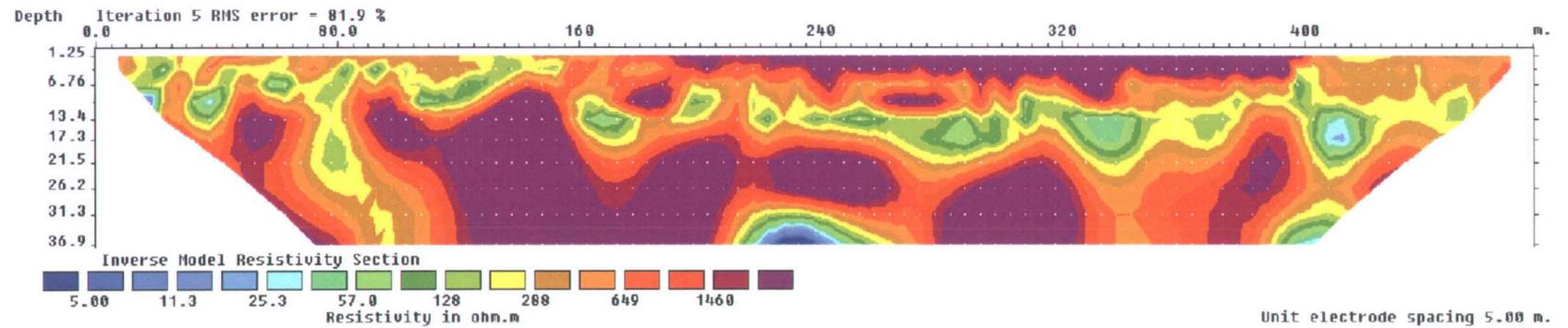


FIGURE B.11 – Profil CAB

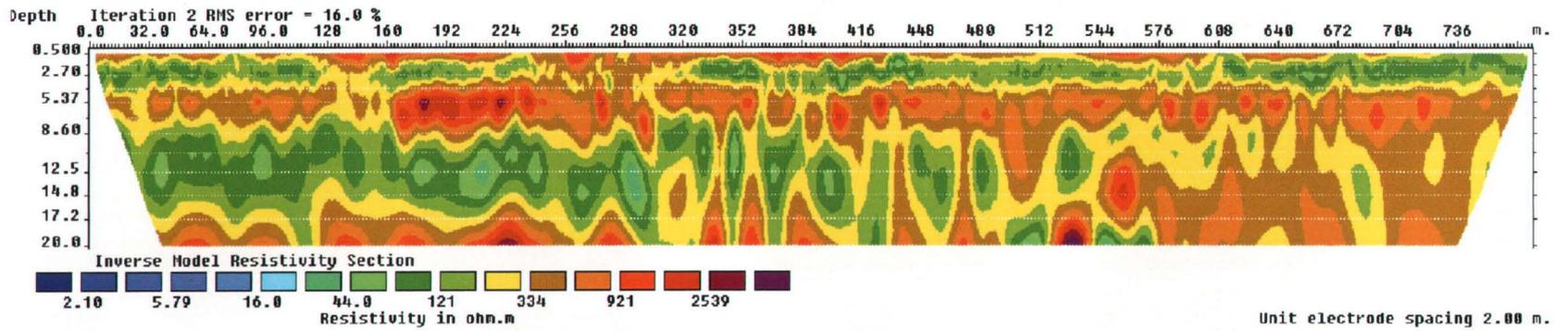


FIGURE B.12 – Profil STL16

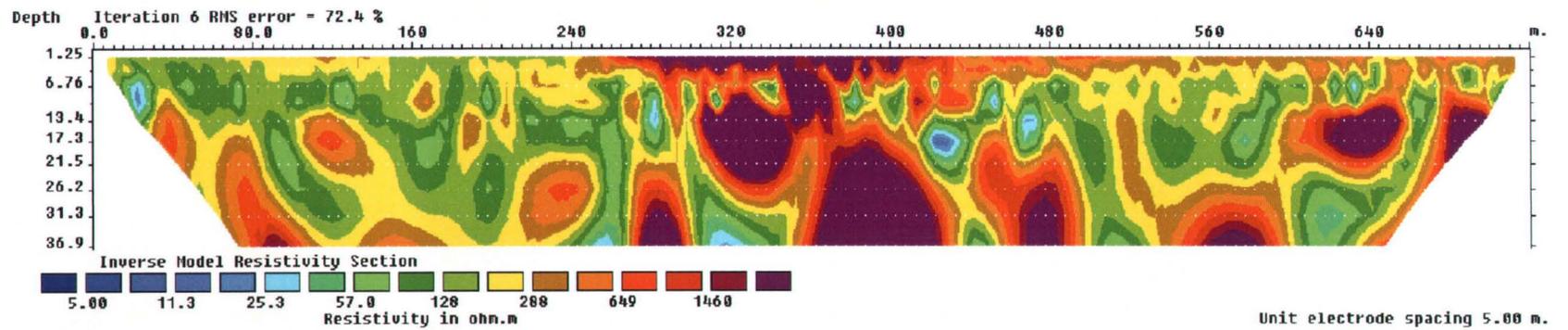


FIGURE B.13 – Profil Savane 12

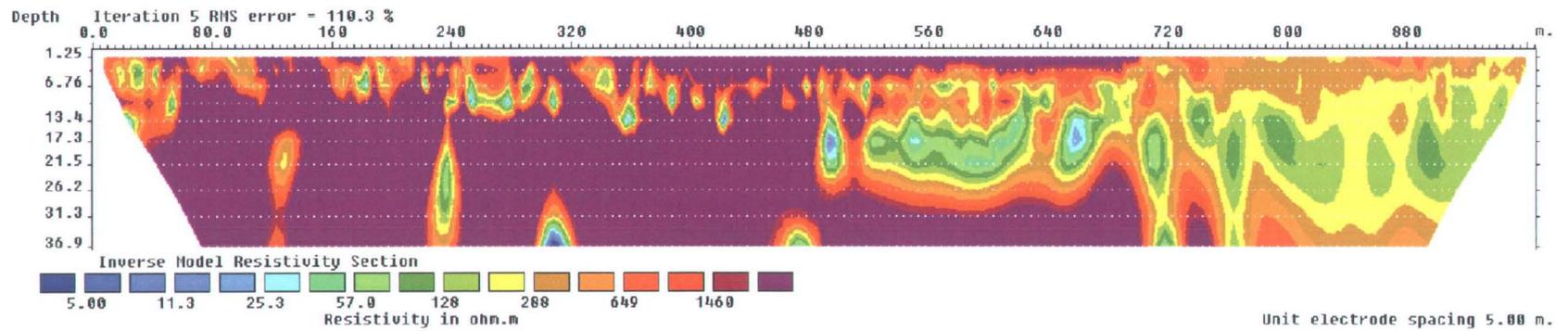


FIGURE B.14 – Profil Savane 345

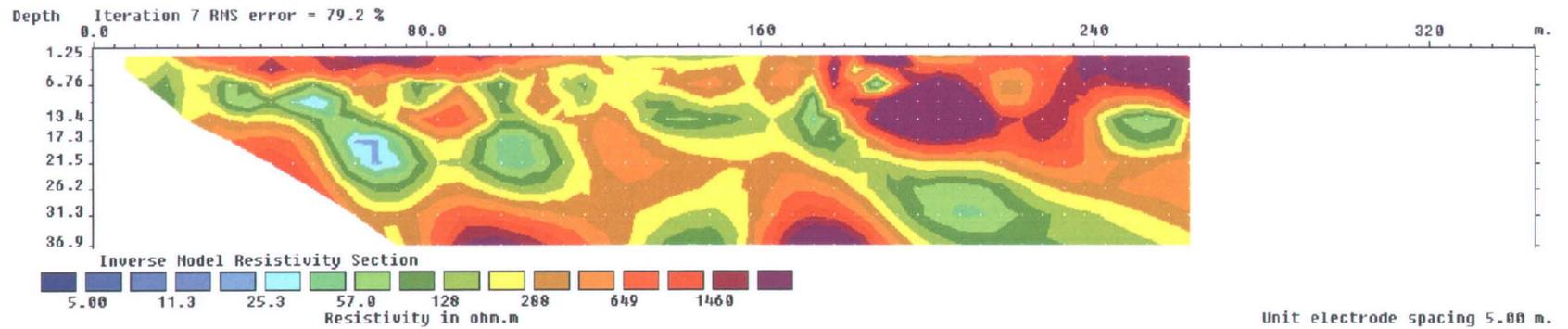


FIGURE B.15 – Profil P8

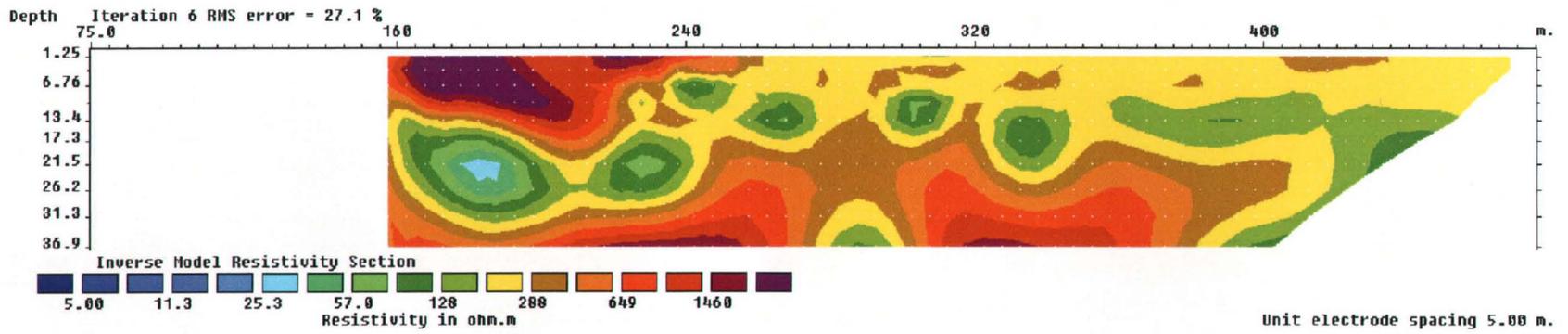


FIGURE B.16 – Profil P8-2

C Détails des CPT

TABLE C.1 – Information sur les CPT

# Fichier Foreuse	Profondeur (m)	Nom du levé	Positionnement géographique du levé			Puits							
			X	Y	Z (sol)	#	Profondeur du sol (m)	X	Y	Z (PVC)	PVC-nappe	Z (nappe)	
G19S0606C	9,25	CPT-100	324992,21	5163287,02									
G20S0603C	12,5	CPT-00	325082,69	5163880,64		P00							
G21S0601C	5,5	CPT-101	324795,81	5163622,45									
G20S0602C	11	CPT-102	324782,57	5163507,69									
G29Y0702C	3,35	CPT-01-A	325040,36	5164314,64	119,507								
G29Y0703C	12	CPT-01-B	325046,66	5164317,45	119,907								
G29Y0704C	8,8	CPT-01	325047,26	5164306,85	119,507	P01	8,56	325047	5164307	120,2	0,61	119,541	
G30Y0701C	7	CPT-02	325124,5	5164200,07	120,749	P02	7,09	325124	5164200	121,2	1,56	119,594	
G30Y0702C	10,7	CPT-103	325184,33	5164121,78									
G31Y0701C	7,3	CPT-03	326146,51	5163539,92	123,923	P03	12,04	326147	5163540	124,5	2,16	122,378	
G05U0703C	8,8	CPT-04	324473,37	5162532,72	122,34	P04	14,9	324473	5162533	122,7	1,19	121,523	
G06U0701C	8,5	CPT-05	325850,59	5162394,43	118,611	P05	8,8	325851	5162394	119	0,3	118,68	
G06U0703C	8,5	CPT-06	324136,71	5162999,29	116,41	P06	8,8	324137	5162999	116,7	0,44	116,238	
G07U0702C	11,88	CPT-07	323943,55	5162126,81	119,134	P07	19,78	323944	5162127	119,8	1,03	118,738	
G08U0701C	7,3	CPT-08-A	323615,52	5162479,25	117,108								
G08U0702C	7,9	CPT-08	323621,07	5162476,94	117,108	P08	12,92	323621	5162477	117,3	1,11	116,172	
G08U0703C	4,1	CPT-09	323697,74	5162999,39	115,222	P09	11,13	323698	5162999	115,9	1,13	114,779	
G11U0701C	9	CPT-10	324504,48	5163595,83	116,382	P10	8,81	324504	5163596	116,6	0,81	115,753	
G11U0702C	1	CPT-11-A	324906,04	5162988,38	122,308								
G11U0703C	1	CPT-11-B	324906,04	5162988,38	122,308								
G11U0704C	1,5	CPT-11-C	324906,04	5162988,38	122,308								
G11U0705C	2,5	CPT-11-D	324906,04	5162988,38	122,308								
G11U0706C	1,5	CPT-11-E	324906,04	5162988,38	122,308								
G11U0707C	8	CPT-11	324906,04	5162988,38	122,308	P11	7,07	324906	5162988	122,3	1,69	120,618	
G12U0701C	5,5	CPT-12	323402,34	5161906,41	116,659	P12	7,33	323402	5161906	117,3	0,4	116,916	
G12U0702C	8,5	CPT-104	326650	5165168	117								
G12U0703C	4,5	CPT-13	326627	5165044	123	P13	5	326627	5165044	123			
G20S0701C	2,7	CPT-14	325383,08	5163589,06	121,463	P14	6,7	325383	5163589	122,3	1,29	121,045	
G20S0702C	5,5	CPT-14-A	325390,14	516359,99									
G21S0701C	7,5	CPT-15	325043,43	5163855,67	119,385	P15	9,41	325043	5163856	119,9	1,01	118,933	
G25S0701C	6,5	CPT-16	325066,98	5163440,2	119,658	P16	10,57	325067	5163440	120,4	0,98	119,462	
G25S0702C	11	CPT-17	324586,05	5163352,11	117,414	P17	11,99	324586	5163352	118,1	0,57	117,518	
G26U0801C	11,5	CPT-18	324593,46	5163342,41	117,791	P18		324593	5163342				
G26U0802C	11	CPT-19	324603,54	5163348,98	117,982	P19		324604	5163349				
G26U0803C	11	CPT-20	324595,1	5163354,14	117,647	P20		324595	5163354				
G26U0804C	10,5	CPT-21	324594,63	5163350,15	117,753	P21		324595	5163350				

