

Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la- Madeleine

297

DB24

Les effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière

6210-10-001

Phase 1 : Caractérisation électrique des aquifères

Rapport final

Michel Chouteau
Rachid Intissar

30 Juin 2010

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	3
Liste des figures	5
<i>1. Contexte</i>	<i>7</i>
<i>2. Rappel du principe de la méthode de la résistivité électrique</i>	<i>9</i>
2.1 . Considération générale sur la résistivité électrique des sols	11
2.2 . Tomographie électrique	13
<i>3. Étude de sensibilité des méthodes électriques pour la détection d'infiltrations salines</i> <i>15</i>	
3.1 . Propriétés physiques.....	15
3.2 . Modèle de porosité.....	17
3.3 . Infiltration verticale d'eau de mer	17
<i>4. Acquisition des mesures</i>	<i>19</i>
<i>5. Traitement et interprétation des données</i>	<i>21</i>
5.1 . Traitement et interprétation des mesures réalisées sur le secteur de Fatima.....	25
5.2 . Traitement et interprétation des mesures du secteur de l'Étang-du-Nord	38
<i>6. Étude de faisabilité des méthodes électromagnétiques transitoires (TDEM).....</i>	<i>45</i>
6.1 . Principe de la méthode TDEM	45
6.2 . Simulations des sondages TDEM	48
<i>7. Mesures TEM</i>	<i>52</i>
<i>8. Discussion et Conclusion</i>	<i>63</i>
<i>9. Références</i>	<i>66</i>
<i>Annexe 1.....</i>	<i>69</i>
<i>Annexe 2.....</i>	<i>85</i>
<i>Annexe 3.....</i>	<i>88</i>
<i>Annexe 4.....</i>	<i>89</i>
<i>Annexe 5.....</i>	<i>91</i>
<i>Annexe 6.....</i>	<i>92</i>

Résumé

Des mesures de résistivité électrique ont été réalisées aux Îles-de-la-Madeleine sur deux longs profils à quatre occasions entre les mois de mai et de novembre 2009. Les premières ont été réalisées entre le 18 et le 23 mai, les deuxièmes entre le 6 et le 10 juillet, les troisièmes entre le 4 et le 9 septembre et les quatrièmes entre le 11 et le 18 novembre. L'objectif de ces mesures répétées consiste à tester la capacité de la méthode de tomographie électrique (TRE) à révéler les changements possibles dans le système aquifère de l'île de Cap-aux-Meules (Îles-de-la-Madeleine). Ces changements sont possibles à cause des variations de la quantité d'eau douce extraite par les systèmes de pompage (en fonction de la consommation de la population en eau potable). Théoriquement, la consommation en eau potable augmente pendant l'été avec la grande fréquentation touristique. Un pompage excessif peut entraîner une intrusion de l'eau salée (qui est partout en contact avec l'aquifère de l'île Centrale) ainsi que la remontée de la zone de transition eau douce-eau salée. L'autre facteur qui peut affecter le système aquifère, se manifeste dans la variation des précipitations (unique source de recharge) en fonction du temps. Dans l'objectif de révéler les changements dans l'aquifère, nous avons conduit des mesures le long de deux profils, situés respectivement dans le secteur de Fatima et L'Étang-du-Nord. Afin de faciliter la comparaison des sections de résistivité obtenues pour les quatre répétitions, les mesures sont inversées à l'aide de la même séquence de traitement.

Dans les deux secteurs étudiés, les quatre séries de mesures ont permis de déceler les principales structures. Il s'agit d'une couche résistante en surface ($600 \Omega.m$) ayant une épaisseur d'environ 5 m. Cette couche représente le mort-terrain non saturé. En dessous du mort-terrain on trouve une couche moins résistante ($110 \Omega.m$) avec une épaisseur d'environ 10 m. Cette couche représente la partie supérieure non saturée de l'aquifère gréseux. Elle est suivie de l'unité géologique la plus prépondérante qui s'étend sur toute la profondeur étudiée. Il s'agit de l'aquifère gréseux saturé avec une résistivité moyenne de $55 \Omega.m$. Ces derniers ordres de grandeur de la résistivité indiquent généralement l'existence de la nappe d'eau douce.

Dans les portions des levés en bordure du golfe du Saint-Laurent, une couche plus conductrice apparaît à plus de 55 m de profondeur dans le secteur de Fatima et à 30 m dans le secteur de l'Étang-du-Nord. Cette couche pourrait indiquer la zone de transition eau douce-eau salée.

La comparaison des résultats (des mesures décalées d'environ deux mois) montre que les principales structures sont toujours mises en évidence. Quelques changements mineurs apparaissent parfois; toutefois, il est difficile de les interpréter comme des changements dans le système aquifère; ils peuvent être liés soit au positionnement non-identique des électrodes d'une fois à l'autre soit aux paramètres utilisés pour l'inversion. L'installation d'électrodes permanentes devrait permettre d'éliminer ces artéfacts.

Deux autres campagnes de terrain ont eu lieu aux mois de mai et de juin 2010 en utilisant la méthode électromagnétique transitoire (TEM) afin de mieux déterminer l'interface eau douce-eau salée pour des profondeurs supérieures à 60 m (limite de la portée de la méthode TRE). Vingt-quatre (24) sondages ont été réalisés, soit 16 sur le profil TRE d'Étang-du-Nord (EDN) et 8 sur le profil TRE de Fatima, en utilisant deux équipements complémentaires afin de déterminer le modèle géoélectrique de 0 à 250 m de profondeur. Les modèles obtenus montrent que le biseau d'eau salée pénètre de 30 m sous la côte, pour le profil EDN, jusqu'à 140 m vers le nord de manière continue, alors que le biseau est localisé à 60 m sous la côte pour le profil de Fatima, s'enfonçant jusqu'à 145 m vers le sud; cependant ce dernier est d'extension limitée vers le sud (~700-800 m). La méthode TEM a démontré qu'elle était appropriée pour délimiter l'interface eau douce-eau salée à des profondeurs supérieures à 150 m. Un suivi de la position de cette interface est donc possible.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Lignes de courant (lignes continues) et courbes équipotentielles (lignes en tirets) induites par deux électrodes de courant C1 (+I) et C2 (-I) (adaptée de Reynolds, 1997)	10
Figure 2 : Modèle de porosité.....	17
Figure 3 : Modèle de résistivité sans infiltration.....	18
Figure 4 : Modèle de résistivité avec concentration maximale de l'infiltration à 100 m de profondeur	19
Figure 5 : (a) Pseudo-section (réponses) de la résistivité du modèle de sol [1 (600 Ω .m, 5 m); 2 (70 Ω .m, 35 m); 3 (10 Ω .m)], (b) modèle de résistivité, résultat de l'inversion de la pseudo-section des données de résistivité apparente présentée en (a).....	25
Figure 6 : Localisation des levés de résistivité réalisés dans le secteur de Fatima.....	27
Figure 7 : Modèles de résistivité obtenus par inversion pour trois acquisitions différentes sur la portion de FAT1. La même séquence de traitement est appliquée pour les trois ensembles de données.....	28
Figure 8 : Comparaison des sections obtenues, au cours de la 3ème campagne de mesures, sur la portion FAT1 avec deux espacements unitaires; 5 m (figure a) et 2.5 m (figure b). L'épaisseur du mort-terrain dé-saturé est plus précisément déterminée sur le levé aux 2.5 m.	30
Figure 9 : Comparaison des quatre sections de résistivité électrique (FAT3), obtenues pour les quatre campagnes de mesure. Les données sont inversées en appliquant la même séquence de traitement.	32
Figure 10 : Modèles de résistivité obtenus par inversion des mesures réalisées au niveau du levé « puits #8 », (a) mesures effectuées le 9 septembre, (b) mesures effectuées le 13 novembre, (c) localisation des zones où les données sont de faible qualité pour le levé du 9 septembre (d) localisation des zones où les données sont de faible qualité pour le levé du 13 novembre	34
Figure 11 : Modèles de résistivité obtenus par l'inversion des mesures acquises sur le levé de Fatima, (a) mesures réalisées entre le 6 et le 8 juillet (b) mesures réalisées entre le 4 et le 6 septembre (c) mesures réalisées entre le 11 et le 13 novembre.....	36
Figure 12 : Localisation du profil réalisé sur le secteur de l'Étang-du-Nord.....	39
Figure 13 : Zones montrant les données, négatives et de faible qualité, que nous avons éliminées pour aider le programme à améliorer l'ajustement.....	40
Figure 14 : Modèles de résistivité obtenus d'inversion de la première portion du profil de l'Étang-du-Nord pour les quatre campagnes de mesures.	41
Figure 15 : Modèles obtenus par l'inversion des données acquises sur le levé de l'Étang-du-Nord pendant les quatre campagnes de mesures	43
Figure 16 : Principe de la méthode TDEM. (a) Diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure du courant injecté; (b) Forme de l'onde de courant injectée avec la force électromotrice générée dans le sol lors de la coupure du courant; (c) Illustration de l'échantillonnage du signal mesuré (adapté de McNeil, 1990)	47
Figure 17 : Configuration centrale utilisée avec une boucle de transmission carrée (20 m x 20m) et une bobine réceptrice en bleu au centre pour la mesure de dB/dt.....	49

Figure 18 : Réponses TDEM des modèles de sous-sol considérés pour les Îles-de-la-Madeleine (tableau 4). La configuration centrale est adoptée pour cette simulation, avec une boucle de transmission carrée de 20 m de côté.	50
Figure 19 : réponses TEM pour des interfaces eau douce-eau salée à 105 et 205 m. Les trois premières bandes de données (temps courts) correspondent aux données prises avec le TEM47 alors que les trois bandes suivantes (temps plus longs) correspondent à celles prises avec le TEM57.....	51
Figure 20 : position des sondages TEM sur les profils Étang-du-Nord et Fatima. Les icônes jaune (EDN) et orange (Fatima) indiquent les positions des forages existants.....	53
Figure 21 : interprétation du sondage Etan03 à partir des données acquises en utilisant le TEM47. La courbe rose correspond à l'interprétation sous forme de résistivité graduelle; la courbe verte correspond à l'interprétation sous forme de couches présentant des contrastes de résistivité marqués. Les résistivités et épaisseurs des couches pour cette approche sont indiquées dans l'encadré.	55
Figure 22 : interprétation du sondage Etan03 à partir des données acquises en utilisant le TEM57. La courbe rose correspond à l'interprétation sous forme de résistivité graduelle; la courbe verte correspond à l'interprétation sous forme de couches présentant des contrastes de résistivité marqués. Les résistivités et épaisseurs des couches pour cette approche sont indiquées dans l'encadré.	56
Figure 23 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil d'Étang-du-Nord.....	60
Figure 24 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil de Fatima..	61
Figure 25 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil de Fatima, incluant la station Fat04j située au sud-est du profil.....	62

Contexte

L'archipel des Îles-de-la Madeleine fait parti du Québec maritime, et est situé en plein cœur du golfe du Saint-Laurent. Cet archipel est composé d'une douzaine d'îles, dont six sont reliées entre elles par des étroits cordons sableux. La surface totale de l'archipel est d'environ 202 km². L'eau souterraine représente l'unique source d'eau potable pour la population des Îles-de-la Madeleine. La formation géologique du membre de l'Étang-des-Caps, composée de grès éoliens rouges à laminations obliques géantes est considéré comme le meilleur aquifère renfermant l'eau souterraine. Cette formation couvre environ le tiers de la surface totale de l'archipel et elle est recouverte par un mélange de dépôts de sable et d'argile. La perméabilité des grès est très élevée et laisse infiltrer environ 30 % des précipitations qui rechargent l'aquifère. La forte perméabilité de l'aquifère l'expose aussi à des risques d'intrusion et de remontée de l'eau salée sachant qu'il est en contact hydraulique partout avec les eaux du golfe du Saint-Laurent. L'autre source possible de contamination de l'aquifère provient des activités humaines de surface. Le risque de contamination par l'eau salée préoccupe les autorités depuis longtemps. Dans ce cadre, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec a réalisé en 1979 un plan de gestion de l'exploitation. Ce plan vise la détermination de la quantité d'eau qui peut être extraite de chacune des îles de l'archipel ainsi que les zones dans lesquelles il est possible d'installer d'autres puits de captage. Récemment (2002-2004), le groupe Madelin'Eau a réalisé, pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, des études hydrogéologiques visant la mise à jour des informations mises en évidence en 1979. Ainsi, le groupe Madelin'Eau, a réalisé des tests de pompage afin de déterminer les paramètres hydrogéologiques de chacun des captages tels que la transmissivité, le débit sécuritaire, etc. Ces études ont été couplées avec des levés de tomographie électrique. Les mesures électriques ont permis de cartographier la zone non saturée en surface ayant une résistivité élevée (plus de 500 Ω.m). Cette couche est suivie de la nappe d'eau douce où la résistivité diminue avec la profondeur en passant de la partie non saturée (environ 110 Ω.m) vers la zone saturée (environ 50 Ω.m). Les portions des levés proches du golfe du

Saint-Laurent ont montré des résistivités faibles (moins de 20 Ω .m). Ces valeurs sont caractéristiques d'un aquifère saturé d'eau salée et indiquent une possible intrusion d'eau salée dans l'aquifère gréseux. Ceci a été observé surtout vers l'Étang-du-Nord situé au sud de l'île Centrale. Quelques autres zones conductrices ont été cartographiées également à côté des puits de pompage. Ces anomalies ont été associées à une remontée possible de la zone de transition saumâtre à cause de pompages excessifs. Suite à ces résultats, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (Direction des Politiques de l'eau) a décidé d'effectuer plus de mesures dont le but de tester la capacité des méthodes électriques et électromagnétiques pour le suivi de la qualité de l'eau souterraine en général, et pour la surveillance de l'intrusion et de la remontée de l'eau saumâtre en particulier. Dans ce cadre, le Ministère a octroyé un contrat au Laboratoire de Géophysique (LAGA) de l'École Polytechnique de Montréal pour la réalisation de ce travail. Le LAGA a estimé que la meilleure façon est de réaliser des mesures répétées dans le temps (environ tous les deux mois) le long de deux grands profils sélectionnés pour la variété des anomalies recensées et les corrélations possibles avec des puits existants. Ensuite, les données acquises à différentes périodes de temps sont traitées de la même façon afin de relever les changements possibles.

Rappel du principe de la méthode de la résistivité électrique

La méthode de la résistivité électrique consiste à injecter un courant électrique et à mesurer la différence de potentiel électrique générée par le passage du courant dans les formations investiguées. Cette différence de potentiel est fonction de la résistivité des structures traversées par les lignes de courant et varie également en fonction du dispositif de mesure. La distribution de la résistivité électrique peut ainsi être déterminée, donnant notamment de l'information sur la teneur en eau et sa salinité, et sur la nature et la géométrie des formations investiguées.

La mesure de la résistivité du sol nécessite quatre électrodes. Deux de ces électrodes, dites de courant (C_1 , C_2), font circuler dans le sol un courant pulsé d'intensité fixée. La différence de potentiel induite dans le sol par la circulation de ce courant est mesurée aux deux autres électrodes, dites de potentiel (P_1 , P_2). L'injection de courant et l'acquisition des différences de potentiel, rendus possible grâce à un tel quadripôle, sont contrôlées par le résistivimètre.

La circulation d'un courant continu dans un demi-espace homogène infini entre quatre électrodes est représentée dans la figure 1. Le courant entre dans le sol en un point C_1 ($+I$) et en sort par un point C_2 ($-I$). Le potentiel en un point M quelconque est la somme des contributions des sources C_1 et C_2 .

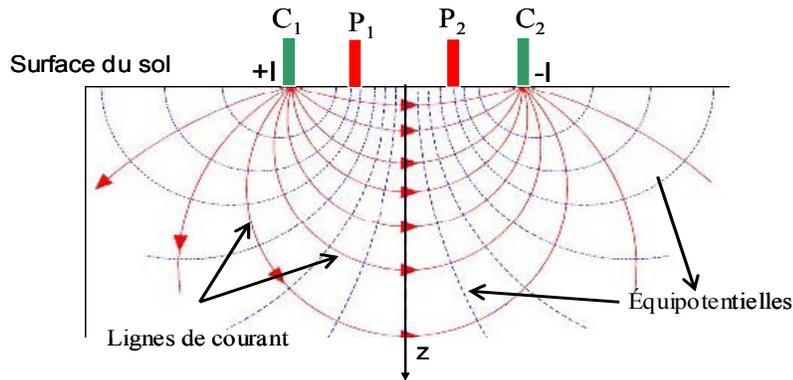


Figure 1 : Lignes de courant (lignes continues) et courbes équipotentiellles (lignes en tirets) induites par deux électrodes de courant C1 (+I) et C2 (-I) (adaptée de Reynolds, 1997)

La différence de potentiel entre P₁ et P₂ s'écrit alors (Reynolds, 1997) :

$$\Delta V = V(P_1) - V(P_2) = \frac{\rho I}{K} \quad (1)$$

où K est un facteur géométrique :

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right]^{-1} \quad (2)$$

Le facteur géométrique K dépend du dispositif de mesure utilisé, c'est-à-dire de la disposition relative des électrodes de courant et de potentiel.

La résistivité du demi-espace homogène vaut :

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Lorsque le sol n'est pas homogène, la résistivité mesurée par l'équation (3) est dite apparente (ρ_{app}) car elle diffère de la résistivité réelle ou intrinsèque du sol en un point particulier. La valeur de résistivité apparente obtenue lors d'une mesure résulte en effet de la contribution de chacun des volumes de sol traversés par le courant injecté, en fonction de leur résistivité et de leur localisation par rapport aux électrodes de mesure.

. Considération générale sur la résistivité électrique des sols

Dans un système solide-eau, la conductibilité électrolytique est prépondérante dans la plupart des types de sol comme le cas des Îles-de-la-Madeleine, car les grains de la matrice eux-mêmes sont de médiocres conducteurs électriques. Cela signifie que ce sont les ions en solution qui transportent des charges sous l'effet du champ électrique. Le courant passe essentiellement par l'eau interstitielle, mais il peut également passer le long des surfaces des particules par la double couche ionique diffuse (cas de l'argile). La résistivité d'un sol va dépendre alors de différents facteurs :

- **Porosité**

La porosité est définie comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume total de l'échantillon. Pour un échantillon saturé par un fluide donné, quand la porosité décroît, la résistivité doit croître. Dans le cas du principal aquifère gréseux des Îles-de-la-Madeleine, composé essentiellement des grès rouges, la porosité estimée est d'environ 30 % (Rapport Groupe Madelin'Eau, page 25).

Archie (1942) a relié la résistivité électrique (ρ) d'un sol saturé à la résistivité électrique (ρ_w) du fluide interstitiel par la relation suivante :

$$\rho_{app} = a \rho_w \phi^{-m} \quad (4)$$

où ϕ est la porosité, a et m sont des constantes dépendant du type de sol et ρ_w est la résistivité du fluide interstitiel. Cette équation montre que la résistivité électrique d'un sol saturé est sensible à la porosité, à la résistivité électrique du fluide interstitiel, aux caractéristiques des solides et à la structure des pores (c'est-à-dire que différents sols avec les mêmes ρ_w et ϕ peuvent avoir différentes valeurs de a et m). La constante m est connue sous le nom de facteur de cimentation et varie entre 1.4 et 2.2 respectivement pour les sables propres et les graviers contenus dans les couches aquifères (Huntley, 1986). Dans le cas des grès consolidés, la constante m est de l'ordre de 1.95 (Campos, 2004). Cependant, la loi d'Archie ne s'applique pas rigoureusement pour les sols contenant une fraction

argileuse ou une concentration importante de particules métalliques à cause de deux phénomènes distincts. Dans les sols argileux, la conductivité électrique se produit dans les pores et à la surface des particules d'argile via la double couche ionique diffuse (Urish, 1981). Cette loi ne s'applique pas également lorsque le matériau est composé d'un pourcentage élevé de particules métalliques qui sont plus au moins en contact entre elles et présentent une conduction électronique importante qui s'ajoute à la conduction électrolytique (cas des gisements de métaux).

- **Degré de saturation**

La résistivité électrique dépend aussi du degré de saturation S_r ($=V_w/V_v$) où V_w est le volume de l'eau et V_v le volume des vides. La résistivité d'un sol non saturé ρ peut être reliée à celle d'un sol saturé ρ_{sat} (McNeil, 1990) comme suit :

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S_r^{-B} \quad (5)$$

où S_r est le degré de saturation et B est un paramètre empirique de l'ordre de 2. Cette équation montre que l'augmentation du degré de saturation entraîne une baisse de la résistivité électrique. Elle est applicable lorsque le degré de saturation est au-dessus d'une valeur critique S_{cr} , qui correspond à la quantité minimale d'eau requise pour maintenir un film d'eau continu autour des particules solides. Il existe une valeur critique de la teneur en eau volumique, de l'ordre de 4% pour les sables et comprise entre 20 et 30 % pour les argiles, pour laquelle il se produit une augmentation rapide de la résistivité électrique (Razafindratsima et al, 2003; Parkhomenko, 1967). Cette valeur peut correspondre à la teneur en eau résiduelle.

- **Conductivité de l'eau contenue dans les pores**

Comme le fluide contenu dans les pores est presque l'unique chemin du courant électrique, plus sa conductivité (inverse de la résistivité) est forte plus la conductivité du sol est forte. La conductivité du sol est directement proportionnelle à la conductivité du liquide contenu dans les pores. Cette conductivité du fluide des pores dépend du type du fluide lui-même,

des sels présents et de leur concentration. L'eau de la mer a une conductivité de plus de 2 milliSiemens/cm ou 200mS/m), tandis que l'eau douce a une conductivité de moins de 0.2 mS/cm (20mS/m). Ce contraste important rend relativement facile la détection des zones envahies par l'eau salée.

▪ **Température**

Lorsque la température augmente, la mobilité des ions augmente, puisque la viscosité de la solution diminue. Le gel augmente beaucoup la résistivité des roches; cependant, l'effet peut être progressif, car les sels en solution abaissent le point de congélation de l'électrolyte qui remplit les pores de la roche. Une roche stérile ou un sol totalement gelé est infiniment résistant (Chapellier, 2000). La résistivité électrique ρ_T d'un sol à la température T (°C) peut être associée à une résistivité électrique standard mesurée à 18 °C par Keller et Frischknecht (1966) :

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18^\circ)} \quad (6)$$

Où α est un paramètre empirique qui est approximativement de l'ordre de $0.025 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

. **Tomographie électrique**

La tomographie électrique vise à reconstruire la distribution de la résistivité (réelle) du sol selon une section verticale (2D) ou dans un volume de sol (3D) à partir des mesures faites avec des configurations d'électrodes de dimensions variables. La première étape de cette méthode d'investigation consiste à réaliser une série de mesures individuelles grâce à des électrodes métalliques enfoncées dans le sol, généralement le long d'un profil (2D). L'espacement minimum entre deux électrodes adjacentes a ainsi que la distance maximum entre dipôle émetteur - dipôle récepteur pour une acquisition donnée déterminent la longueur du profil, la profondeur de pénétration et la résolution désirée. Les mesures électriques sont réalisées selon une séquence prédéfinie. Les valeurs des résistivités apparentes ρ_{app} obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées à l'aplomb du dispositif à une profondeur proportionnelle à la valeur de l'espacement a . On parle alors

de niveaux d'acquisition. Si l'espacement entre les électrodes augmente, la profondeur d'investigation augmente elle aussi. On peut alors représenter les résistivités apparentes mesurées sous la forme d'une pseudo-section qui reflète qualitativement la variation spatiale et verticale de la résistivité apparente.

Afin d'obtenir la résistivité réelle du sol au droit des profils, les valeurs de résistivité apparente doivent être inversées (Reynolds, 1997). Le principe de l'inversion consiste à déterminer des modèles de sol (résistivité réelle) dont la réponse électrique reproduit les résistivités apparentes mesurées (pseudo-section). L'objectif de l'inversion est de déterminer la distribution de la résistivité ρ dont la réponse ajuste les mesures observées ou autrement dit, qui minimise l'écart entre la pseudo-section calculée pour un modèle de sol et la pseudo-section mesurée. Cet écart est généralement quantifié par le critère de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square, RMS, équation 7).

$$\text{Norme L2 : } RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_{cal} - \rho_m)^2} \quad (7)$$

où ρ_{cal} et ρ_m représentent respectivement la résistivité apparente calculée et mesurée en chaque point de la pseudo-section. La fonction d'erreur (RMS) décrite par l'équation (2.12) correspond à la norme L2 ($\sim x_i^2$). La minimisation de cette fonction au cours du processus d'inversion a tendance à atténuer les contrastes, comparativement à l'utilisation d'une fonction d'erreur de type, norme L1 ($\sim |x_i|$, équation 8).

$$\text{Norme L1 : } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\rho_{cal} - \rho_{mes}| \quad (8)$$

De nombreux algorithmes existent pour minimiser la fonction d'erreur (Loke et al, 1996; Loke et al, 2002) et tendre ainsi vers un modèle de sol permettant d'expliquer au mieux les mesures. Le modèle de sol obtenu au terme de l'inversion constitue une solution qui n'est pas nécessairement unique pour représenter la résistivité réelle du sol (Oldenburg et al, 1994).

L'inversion des pseudo-sections dans cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel commercial RES2DINV (Geotomo Software ; <http://www.geoelectrical.com>). Cet outil est

largement utilisé dans les applications de prospection électrique pour l'environnement. Le logiciel génère d'abord un modèle initial du sous-sol avec une résistivité homogène composée de couches d'épaisseurs croissantes avec la profondeur. Cette résistivité homogène initiale est calculée à chaque point de mesure en fonction des paramètres d'acquisition utilisés lors de la prise des mesures. L'épaisseur de la première couche est déterminée en fonction du dispositif utilisé et de l'espacement inter-électrodes. Les épaisseurs des autres couches augmentent de 10 % à 25% avec la profondeur selon le choix de l'utilisateur. Chaque couche est composée d'un certain nombre de cellules rectangulaires. À partir des informations incluses dans le fichier des mesures (notamment le type de dispositif de mesure et l'espacement inter-électrodes), le programme calcule la réponse du modèle en résistivité apparente (ρ_{cal}) aux positions des mesures. Le logiciel RES2DINV cherche alors à réduire l'écart entre des valeurs calculées et les valeurs mesurées (ρ_{mes}) en modifiant les résistivités du modèle. La réduction de cet écart se fait au sens des moindres carrés à l'aide d'un processus itératif. Les calculs de modélisation directe se font par différences finies ou éléments finis suivant le choix de l'utilisateur. La résistivité de chaque cellule du modèle est ainsi mise à jour après chaque itération. Lorsque l'écart entre la pseudo-section et le modèle calculé ne change plus de manière significative, le programme arrête le processus d'inversion en présentant le RMS qui renseigne d'une certaine manière sur la fiabilité du modèle du sous-sol déterminé.

Étude de sensibilité des méthodes électriques pour la détection d'infiltrations salines

. Propriétés physiques

D'après les figures contenues dans le rapport du Groupe Madelin'Eau, la résistivité moyenne des grès saturés en eau douce se situe autour de 60 Ω .m. On mentionne également en page 24 de ce rapport que la porosité ϕ des grès (déterminée à l'Université de Sherbrooke) est de l'ordre de 30% et que la perméabilité est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-7} m/s. De plus, les grès seraient faiblement consolidés.

Le facteur de formation (F) est défini comme le rapport de la résistivité de la roche saturée (ρ) à la résistivité de l'eau (ρ_w). Ce facteur est lié à la porosité et au facteur de cimentation (m), tel que $F = \phi^{-m}$. Pour cette étude, on suppose un facteur de cimentation m de 1.3, typique pour des roches sédimentaires faiblement consolidées. On obtient ainsi une valeur de $F = 4.78$. On peut alors estimer que la valeur de la résistivité de l'eau douce est de l'ordre de $\rho/F = 60/4.78 = 12.54$ ohm.m.

On peut également estimer la concentration en sels dissous TDS (en mg/L) dans l'eau douce à partir de la formule :

$$\rho_w = \left[1.6 \times 10^{-4} \cdot TDS \cdot \left(1 + \frac{T-25}{50} \right) \right]^{-1}$$

où T est la température en °C. En considérant que la température de l'eau est de 8°C, on arrive à une concentration de 755 mg/L. La résistivité de l'eau de mer (ρ_{sw}) est calculée en considérant une concentration de 35 000 mg/L, basée sur les valeurs du tableau ci-dessous. En supposant que la température de l'eau est uniforme, on arrive à une valeur de ρ_{sw} de 0.133 Ω .m.

Qualité	Concentration (mg/L)
Fraiche	<1000
Saumâtre	1000 - 5000
Très saumâtre	5000 – 15 000
Saline	15 000 – 30 000
Eau de mer	30 000 – 40 000
Saumure	40 000 – 300 000+

. Modèle de porosité

Un champ de porosité a été généré en considérant une porosité moyenne de 30% et un modèle de covariance exponentielle anisotrope de portées 20 m, 20 m et 3 m selon x, y et z respectivement. Ce modèle sera «soumis» à différents profils de saturation (salinité et profondeur du niveau phréatique) pour générer les différents modèles de conductivité électrique. Le champ de porosité est illustré à la figure 2.

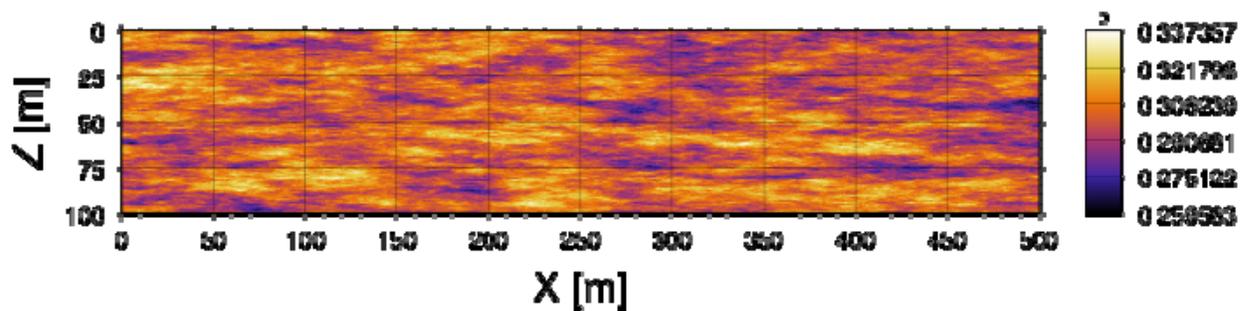


Figure 2 : Modèle de porosité

. Infiltration verticale d'eau de mer

L'influence d'une infiltration d'eau de mer (concentration 35000 mg/L) est étudiée en comparant la réponse après inversion pour un panache relativement étroit montant progressivement de 10 m. L'infiltration est simulée en krigeant le modèle de salinité sous contrainte, en introduisant un ou des points de salinité connue à des profondeurs données. La moyenne de la salinité à travers le modèle est fixée à 755 mg/L. Par exemple, dans le cas de la figure 4, un seul point de contrainte est utilisé à X=300 et Z=100. C'est à ce point que la concentration est maximale, et elle décroît graduellement autour du point pour rejoindre la valeur moyenne. Le taux de décroissance est fonction du modèle de covariance retenu pour le krigeage, ici une covariance exponentielle avec une portée de 20 m selon X et de 10 m selon Z.

Le niveau de la nappe phréatique est à 10 m de profondeur, avec une zone de transition d'un mètre et demi d'épaisseur vers la zone vadose qui a une saturation de 0.2.

Les figures comportent trois images : l'image du haut est le modèle utilisé pour générer les données. L'image du milieu est le résultat de l'inversion obtenue avec res2dinv en utilisant les paramètres par défaut. L'image inférieure est le résultat de l'inversion obtenue en utilisant un modèle dit étendu qui permet de réduire les artéfacts aux extrémités qui sont fréquents avec les dispositifs dipôle-dipôle.

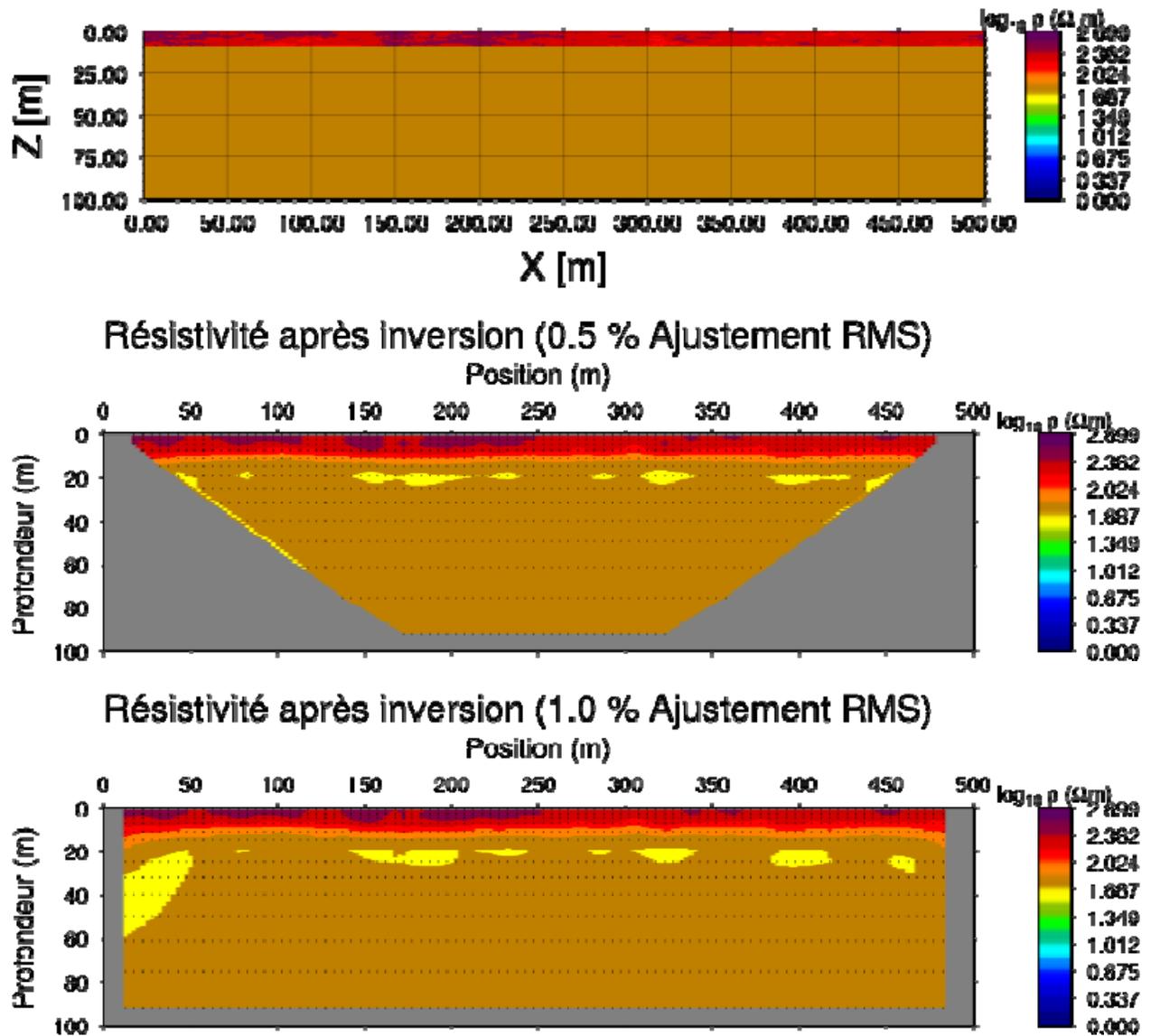


Figure 3 : Modèle de résistivité sans infiltration.

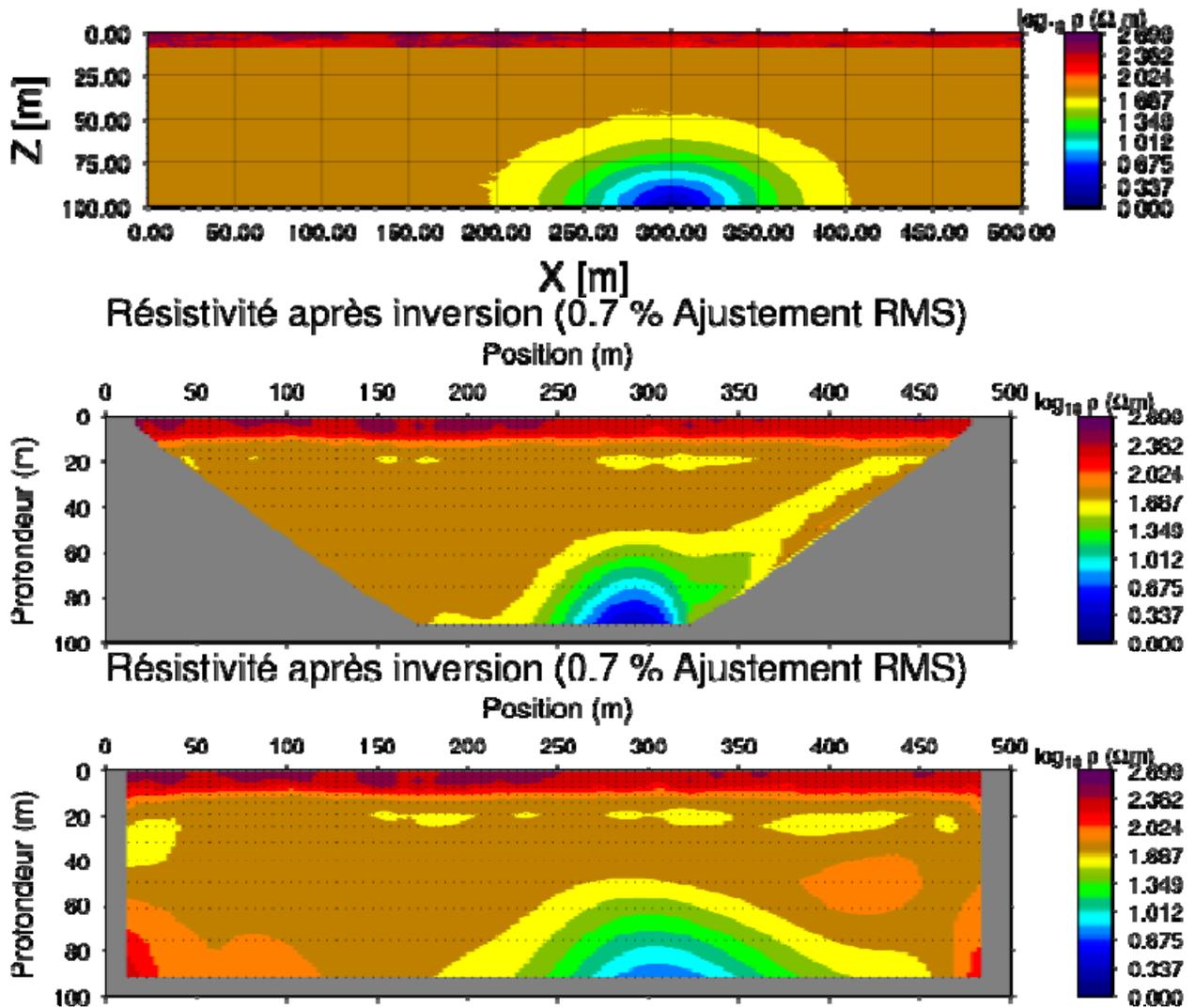


Figure 4 : Modèle de résistivité avec concentration maximale de l'infiltration à 100 m de profondeur

D'autres cas de simulations sont présentées dans l'annexe I.

Acquisition des mesures

Pour les mesures de résistivité électrique réalisées aux Îles-de-la-Madeleine, nous avons utilisé le résistivimètre Syscal Pro de 96 électrodes avec un espacement de 5 m entre les

électrodes. L'interrogation des électrodes se fait à travers six gros câbles de 80 m de longueur chacun. Le Syscal Pro est un outil puissant et rapide, il permet la prise de 10 mesures simultanément (10 dipôles de réception pour un dipôle d'injection). Il permet également d'injecter un courant de haute intensité, jusqu'à 2.5 A avec une puissance de 500 watt (800 V tension maximum). L'alimentation se fait à l'aide d'une batterie marine externe 12V à décharge profonde (taux de décharge possible jusque 80 % et une bonne durée de vie). Ces caractéristiques permettent de cartographier le sous-sol en grande profondeur avec plus de rapidité. Le courant injecté peut être automatiquement ajusté pour optimiser la différence de potentiel mesurée et s'assurer d'une bonne qualité de mesure, mais l'utilisateur peut aussi choisir d'injecter un courant spécifié. Le Syscal Pro possède un module qui permet la vérification des connexions des électrodes et la mesure de la résistance de contact entre le sol et les électrodes. Le résistivimètre prend un nombre de mesures (stack_min prédéfini par l'utilisateur) sur le même point et calcule l'écart-type. Si l'écart-type est inférieur à 1 %, il considère la valeur moyenne. Dans le cas contraire, il répète les cycles de mesure jusqu'à ce que le nombre maximum de cycles (stack_max) défini par l'utilisateur soit atteint. Pour nos mesures, la séquence d'acquisition adoptée a été créée à l'aide du logiciel Electre Pro (version 1.06, Iris Instruments, 2009) avec les paramètres suivants :

- dispositif: dipôle-dipôle;
- écartement unitaire entre deux électrodes adjacentes ($a=5$ m);
- facteur de qualité exigé (écart-type) : 1%;
- nombre minimal de cycles "stack_min" : 4;
- nombre maximal de cycles "stack_max" : 8;
- nombre de niveaux (n) : Pour une séquence d'acquisition avec un écartement ($d=n.a$) entre dipôle d'émission et dipôle de réception, toutes les mesures effectuées avec le même écartement (d) correspondent à un niveau d'investigation (profondeur d'investigation). Lorsque n augmente, la profondeur d'investigation augmente aussi. Dans le cas de nos mesures,

nous avons utilisé des longueurs des dipôles ($d=i.a$) avec i variant de 1 à 9 et des distances dipôle émetteur-dipôle récepteur ($j.d$) avec j variant de 1 à 6;

- La période de l'onde de courant injectée (500 ms).

On commence l'acquisition de chaque profil avec une longueur de 475 m en utilisant une séquence de base (4795 lectures). Ensuite, on continue l'acquisition avec la technique de roulement (mieux connu par son appellation anglaise «roll-along»). Cette technique consiste à déplacer pour chaque acquisition les trois premiers câbles et de garder les trois derniers. La séquence du «roll-along» contient 3664 lectures. Lorsque le profil traverse une route, on protège les câbles par des gaines en mousse sans brancher les électrodes. Pour chaque route traversée, on perd les mesures relatives à une ou deux électrodes en fonction de la largeur de la route et la disposition du câble. Dans quelques endroits, le sol était dur et sec conduisant à une forte résistance de contact avec les électrodes. Cela baisse l'intensité du courant injecté et par conséquent, avec un rapport signal/bruit faible, la qualité des données est moins bonne. Pour diminuer la résistance de contact, le sol est arrosé parfois avec de l'eau au niveau des électrodes.

Traitement et interprétation des données

Les données sont transférées du résistivimètre Syscal Pro vers l'ordinateur à l'aide du logiciel Prosys II (version 2.29, Iris Instruments, 2009). Ce logiciel permet également d'effectuer des traitements préliminaires tels que: l'élimination des lectures négatives (faible qualité), la suppression des mesures aberrantes, la visualisation des pseudo-sections, etc. De plus, le logiciel permet d'exporter les données dans un format lisible par le logiciel Res2DINV afin qu'elles soient inversées.

La séparation à l'intérieur des sections obtenues par inversion des variations causées par les structures du sol et les artéfacts numériques (provenant principalement du processus d'inversion) nécessite la comparaison des sections issues de différentes séquences de traitement. Les structures réelles, d'origine géologique, devraient apparaître dans toutes les séquences de traitement (réalistes). La séquence de traitement doit aussi mener vers un modèle géologique plus plausible. Afin de faciliter la comparaison des sections électriques

mesurées à différentes périodes de mesures, la même séquence de traitement doit être appliquée. Dans la suite, on définit les principaux paramètres d'inversion de la séquence de traitement retenue pour l'inversion de l'ensemble des données.

Principaux éléments de la séquence de traitement

- Élimination des résistivités négatives, qui sont causées par des problèmes d'acquisition (faible rapport signal/bruit).
- Élimination des résistivités dont l'écart-type dépasse une certaine valeur (autour de 60 %), déterminée en fonction de la qualité globale des données.
- Définition du facteur d'amortissement : ce paramètre est fonction du niveau de bruit associé aux mesures. Pour les mesures très bruitées, une valeur de l'ordre de 0.3 permet de stabiliser le processus d'inversion et de réduire l'effet du bruit.
- Effet de filtre ("Ratio of the vertical/horizontal filter weight") : ce paramètre permet de donner plus de poids (au cours du processus d'inversion) aux variations verticales ou horizontales, selon les cas. Dans le cas où l'on suspecte que les anomalies de résistivité sont allongées verticalement, une valeur entre 1.5 et 2 est jugée optimale alors qu'une valeur de 0.5 à 0.8 permet de donner plus de poids aux structures horizontales. La valeur de 1.0 donne un poids égal aux deux directions. Dans le cas de nos mesures, une valeur de 0.5 a été utilisée; elle permet d'obtenir des structures subhorizontales plus plausibles géologiquement.
- Choix du type de la grille : Ce paramètre est en fonction du contraste de la résistivité. Pour des changements marqués de résistivité, un maillage plus fin est nécessaire pour déterminer avec plus d'exactitude la distribution de la résistivité dans le modèle alors que pour les changements faibles, un maillage de taille plus grand est utilisé. Dans notre cas, nous avons utilisé un maillage où l'épaisseur de la 1^{ère} couche est de 1.25 m suivie des couches dont l'épaisseur augment de 2.5 %.
- Nombre de nœuds entre deux électrodes adjacentes : le programme permet de choisir 2 ou 4 nœuds en fonction des contrastes de la résistivité et la précision

recherchée. Le choix de 4 nœuds est souhaitable pour un calcul plus exact du modèle de résistivité et particulièrement lorsque ce dernier présente un contraste très élevé de résistivité. Dans cette étude, nous avons utilisé 4 nœuds afin de calculer les modèles de résistivité avec plus de précision.

- Méthode de modélisation directe : au cours du processus d'inversion, Res2Dinv peut utiliser soit la méthode des différences finies ou des éléments finis. Dans le cas où les mesures sont données avec la topographie, la méthode d'éléments finis est la seule méthode utilisée. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode d'éléments finis puisque nos données ont été prises sur une surface comportant du relief.
- Type d'inversion : il existe deux principales méthodes d'inversion : la méthode par moindres carrés (L2) et la méthode robuste (L1). La méthode L2 applique une contrainte de lissage au modèle afin de ne pas avoir des variations de résistivité trop brusques. La méthode L1 permet de mettre en évidence des anomalies de résistivité avec des limites plus franches. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode L1 puisqu'on cherche à mettre en évidence des structures avec de forts contrastes de résistivité (notamment l'interface eau douce / eau salée).

Les variations du relief perturbent la distribution des potentiels. Au fond des dépressions, les équipotentielles sont plus resserrées que normalement alors que c'est le contraire aux sommets des collines. Cet effet affecte l'estimation, par les méthodes électriques, de la forme des anomalies, la profondeur des structures (exemple la profondeur au toit de la nappe), etc. La correction de cet effet passe par la détermination plus précise de la topographie le long des levés de mesure pour ensuite l'inclure dans le processus d'inversion. Dans le cas de nos mesures, les profils choisis présentent un relief assez accidenté (passage à travers un ensemble de marécages, des collines, etc.). Pour cette raison, un contrat a été confié à M. Jean Boucher, arpenteur-géomètre, de Cap-aux-Meules, pour la réalisation des levés topométriques le long de nos profils. Nous avons mis, au cours des mesures électriques, des repères aux niveaux des électrodes aux endroits où le relief manifeste un changement notable. Au total, plus de 200 points ont été repérés. À la fin des

mesures électriques, l'équipe de l'arpenteur-géomètre a réalisé le relevé DGPS de haute-résolution aux points indiqués. Ce levé topométrique a une précision de 4 cm ou moins. Les annexes I et II présentent la variation topométrique le long des deux principaux levés avec quelques commentaires. La différence maximale d'altitude entre les deux extrémités, pour les deux profils, est assez marquée (> 30 m).

Afin de tester la robustesse de la séquence de traitement appliquée, nous avons conduit une simulation à l'aide du logiciel Res2Dmod (Geotomo Software) avec un modèle proche de celui déterminé par le groupe Madelin'Eau pour l'aquifère des Îles-de-la-Madeleine. Ce modèle est composé d'une couche résistive en surface (600 Ω .m) avec une épaisseur de 5 m (couche non saturée en surface). La 2^{ème} couche a une résistivité de 70 Ω .m et une épaisseur de 35 mètres (nappe d'eau douce). La 3^{ème} couche considérée est conductrice avec une résistivité de 10 Ω .m, caractéristique d'un aquifère saturé en eau salée. Un bruit de 2 % a été ajouté aux données avant qu'elle soit inversée à l'aide de Res2Dinv. Le maillage utilisé au cours de l'inversion est le même que celui utilisé dans la modélisation. Ce maillage est composé d'une première couche avec une épaisseur de 2.5 m suivie des couches dont l'épaisseur augmente de 5 % à chaque niveau. La figure 5 montre le modèle obtenu par inversion.

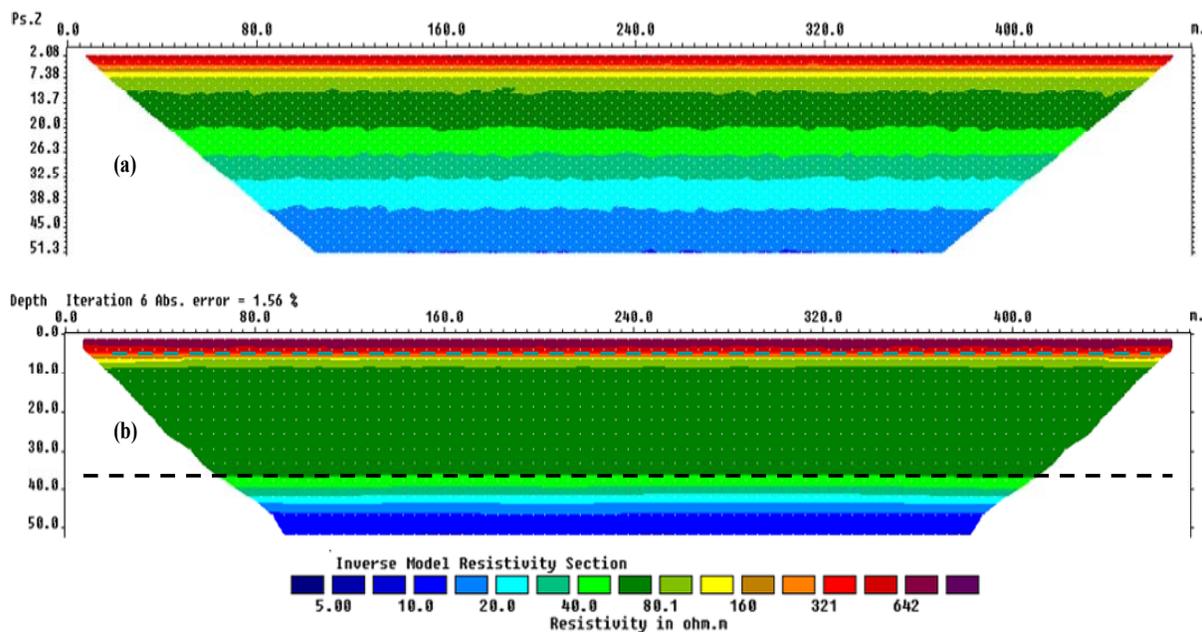


Figure 5 : (a) Pseudo-section (réponses) de la résistivité du modèle de sol [1 (600 Ω .m, 5 m); 2 (70 Ω .m, 35 m); 3 (10 Ω .m)], (b) modèle de résistivité, résultat de l'inversion de la pseudo-section des données de résistivité apparente présentée en (a)

L'analyse de la figure 5b montre que la séquence de traitement appliquée pour l'inversion des données a permis de bien récupérer le modèle de sol proposée ci-dessus. Ainsi, on retrouve la 1^{ère} couche résistante (600 Ω .m) d'une épaisseur de 5 m, suivie de celle avec une résistivité de \sim 70 Ω .m, de 30-35 m d'épaisseur. La dernière couche a été récupérée aussi avec une résistivité qui converge progressivement vers 10 Ω .m. On constate que cette séquence de traitement appliquée ici a permis de retrouver le modèle proposé au départ. Ce résultat appuie d'une certaine manière la robustesse des modèles de l'aquifère qui seront calculés par la suite dans ce travail en utilisant la même séquence de traitement.

. Traitement et interprétation des mesures réalisées sur le secteur de Fatima

La figure 6 montre le tracé du profil électrique (en coordonnées MTM NAD83) réalisé dans le secteur de Fatima. L'annexe II montre les coordonnées des points relevés le long de ce profil. Ces points correspondent aux endroits où la topographie est plus prononcée ainsi que ceux où le levé change de direction. Ce profil commence au sud (Butte du Lac, point GPS

1) et se termine au nord (point GPS 104) près du golfe du Saint-Laurent. La longueur totale du profil est d'environ 2115 m; il traverse trois routes qui sont respectivement: les chemins des Caps, Philipe-Thorne et Edgar-Thorne. Les électrodes non branchées sont les numéros 97 et 98 au niveau du chemin des Caps, 161 et 162 pour le chemin Philipe-Thorne, et 286 et 287 sur le chemin Edgar-Thorne. En raison d'un manque d'accès (troupeaux de vaches dans les champs) qui a causé un retard irrécupérable au cours de la première semaine de mesure (18 au 23 mai), nous nous sommes limités, à deux portions sur ce profil. La première portion (FAT1) est située au nord, entre les points GPS 104 et 86 (voir la figure 6 pour la localisation). Le point de départ de cette portion correspond au bord de la mer sauf pour la première mesure où le départ était à 25 m plus loin, vers le sud. La 2^{ème} portion (FAT3) est située au sud, entre les points GPS 1 et 35. Lors des trois autres périodes de mesures, le profil a été réalisé au complet.

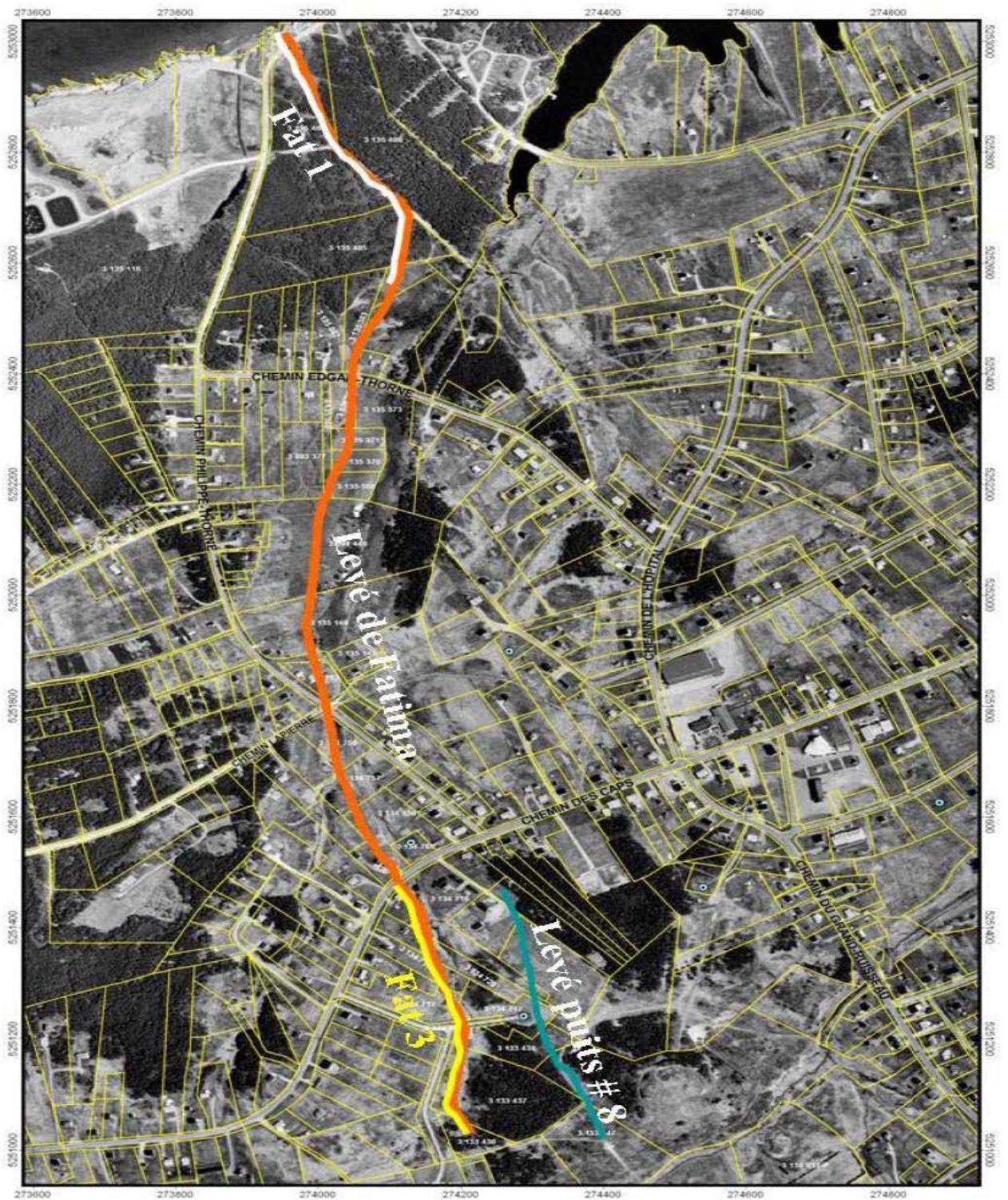


Figure 6 : Localisation des levés de résistivité réalisés dans le secteur de Fatima

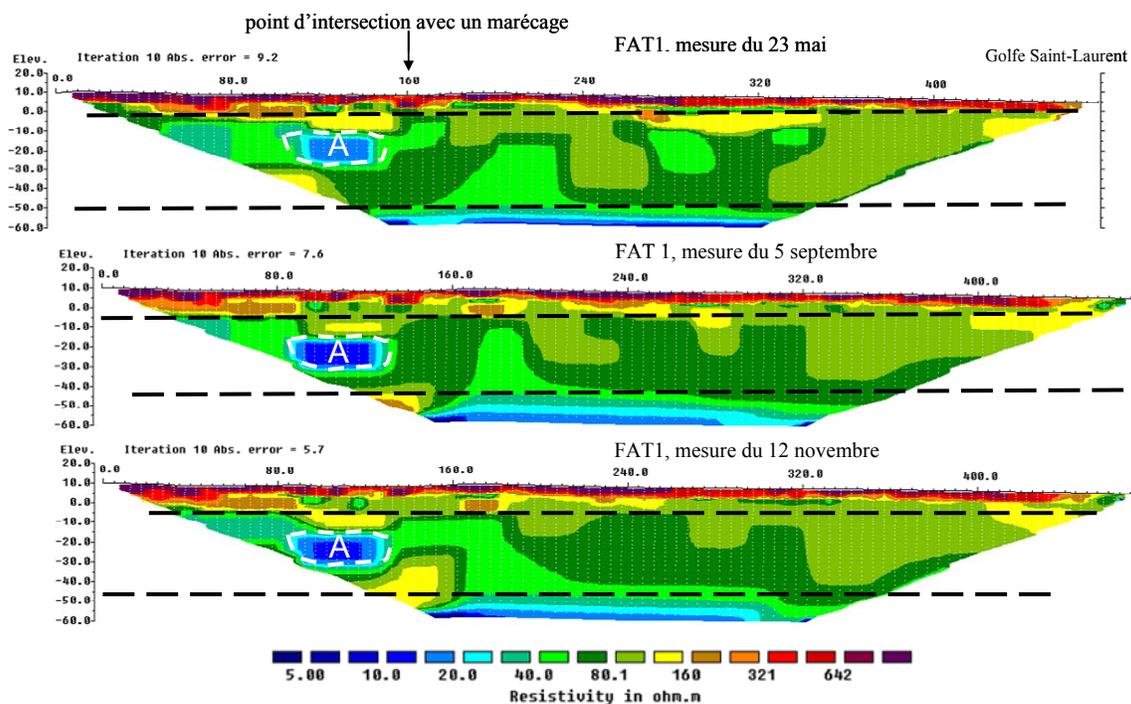


Figure 7 : Modèles de résistivité obtenus par inversion pour trois acquisitions différentes sur la portion de FAT1. La même séquence de traitement est appliquée pour les trois ensembles de données.

La figure 7 montre le résultat des calculs d'inversion des mesures sur la portion FAT1 (voir la figure 6 pour la localisation) pour trois répétitions de mesure. Les données sont inversées en considérant le nouveau levé topométrique réalisé lors de la quatrième campagne de mesure (novembre 2009). Avant l'inversion des données, nous avons supprimé toutes les valeurs aberrantes qui se représentent comme des changements très brutaux de résistivité apparente. Ces valeurs sont liées à un faible rapport signal/bruit, un mauvais contact entre les électrodes et le sol et à la présence d'objets et d'installations enfouies près de la surface. Ainsi, les modèles de résistivité montrés dans la figure 7 sont obtenus après la suppression respectivement de 7.2 %, 6.5 % et 5 % des 3375 données pour les trois séries de mesures.

L'examen de la figure 7 montre que les mesures sont reproduites par les réponses calculées, avec des erreurs quadratiques moyennes inférieures à 9 %. Les couleurs froides (violet,

bleu) représentent les valeurs de faible résistivité; les couleurs chaudes (rouge, orange) indiquent les résistivités élevées. La profondeur d'investigation est ici de l'ordre de 65 m.

L'analyse des quatre sections montre la présence d'une couche résistante en surface avec une résistivité de l'ordre de 500 Ω .m. Cette couche a une épaisseur d'environ 5 m et représente le mort-terrain non saturé. La deuxième unité détectée a une épaisseur d'environ 15 m avec une résistivité d'environ 110 Ω .m. Cette couche inclut parfois des anomalies plus résistives surtout proche du golfe du Saint-Laurent et vers la fin du profil dans la forêt. Cette unité pourrait correspondre à la partie supérieure de l'aquifère non saturé. La troisième unité géoélectrique détectée est plus conductrice et correspond probablement à l'aquifère gréseux plus saturé (couleur vert clair) avec une résistivité d'environ 80 Ω .m. Vers une profondeur de 55 mètres, on constate la présence d'une bande plus conductrice, avec des résistivités inférieures à 40 Ω .m. Cette couche pourrait correspondre à une zone de mélange d'eau douce et d'eau salée qui serait responsable de la chute de résistivité. On note aussi la présence d'une anomalie conductrice au point 110 m (zone A, figure 7) à une profondeur de 25 m. L'observation sur le terrain, lors des mesures, a montré la présence d'un marécage dans la forêt (présence d'eaux usées) à environ 8 m à l'ouest de la position. Ce marécage coupe le levé au point 135m. De plus, le profil change la direction au point 115 m pour suivre le chemin de passage de la conduite de refoulement. Donc, il est fort probable que cette zone conductrice possède une porosité plus élevée permettant de retenir les eaux contaminées qui s'infiltrent à partir de la surface.

La comparaison des quatre mesures répétées dans le temps montre que les structures principales sont mises en évidence dans les quatre sections. Quelques légères différences apparaissent par endroits. L'origine de ces dissemblances est difficile à expliquer et peut être liée à des changements dans les paramètres hydrogéologiques de l'aquifère (notamment le degré de saturation) ou bien à des artéfacts numériques dus au processus d'inversion, ou encore un positionnement légèrement différent des électrodes. Dans le dernier cas, on doit préciser qu'à chaque campagne de mesure nous avons localisé les

électrodes à partir de points de repère GPS pris lors de la première campagne. On évalue que les électrodes ont été réinstallés à leur position prévue à l'intérieur de 1 à 2 m.

Au cours de la 3^{ème} mesure, nous avons réalisé un levé avec un espacement unitaire de 2.5 m. L'objectif de cette mesure consistait à déterminer les structures sur les premiers 30 mètres avec plus de résolution.

La figure 8 montre une comparaison des sections obtenues respectivement avec un espacement unitaire de 5 m et 2.5 m.

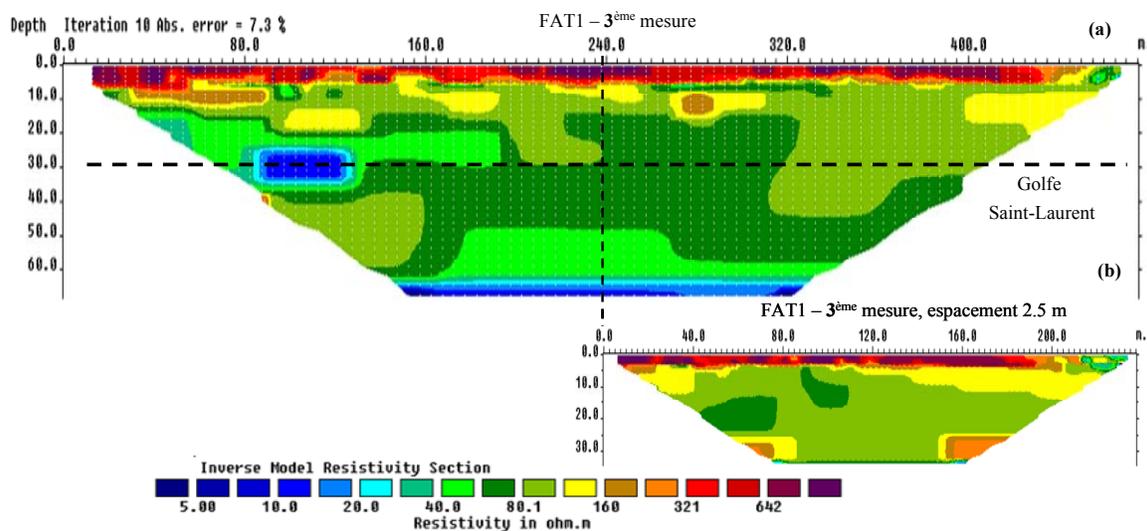


Figure 8 : Comparaison des sections obtenues, au cours de la 3^{ème} campagne de mesures, sur la portion FAT1 avec deux espacements unitaires; 5 m (figure a) et 2.5 m (figure b). L'épaisseur du mort-terrain dé-saturé est plus précisément déterminée sur le levé aux 2.5 m.

L'analyse de la figure 8 montre que les structures mises en évidence dans le profil acquis avec l'écartement de 5 m apparaissent aussi dans celui réalisé avec l'écartement de 2.5 m. La section obtenue par inversion, des mesures réalisées avec l'écartement de 2.5 m, montre que ces lectures sont bien reproduites par les réponses calculées avec une erreur quadratique inférieure à 2 % (aucune valeur négative n'a été enregistrée). Du haut en bas de la figure 8b on note la présence d'une couche résistante (600 Ω .m), avec une épaisseur de 5 m, qui représente le mort-terrain non saturé. Directement sous cette couche on trouve une

formation moins résistante avec une valeur de 160 Ω .m (couleur jaune). L'épaisseur de cette unité diminue vers l'intérieur des terres pour disparaître vers 150 m. L'unité géoélectrique majeure observée sur les sections est une zone plus conductrice (110 Ω .m) et pourrait correspondre à l'aquifère des grès rouges faiblement saturée. Les deux anomalies résistantes, apparaissant en profondeur sur les deux extrémités du profil, correspondent probablement à des artefacts numériques. L'information importante tirée ici est celle de l'absence de l'intrusion de l'eau salée de la mer vers l'intérieur des Îles, pour les premiers 50 m de profondeur.

La figure 8 montre une comparaison des mesures réalisées sur une portion au sud du levé de Fatima (FAT3, figure 6). Cette portion débute près du puits #7, traverse le chemin qui mène au puits # 8 (vers 200 m) et termine au bord du chemin des Caps. Les données sont inversées en considérant la topographie mise à jour (levé topométrique de novembre 2009).

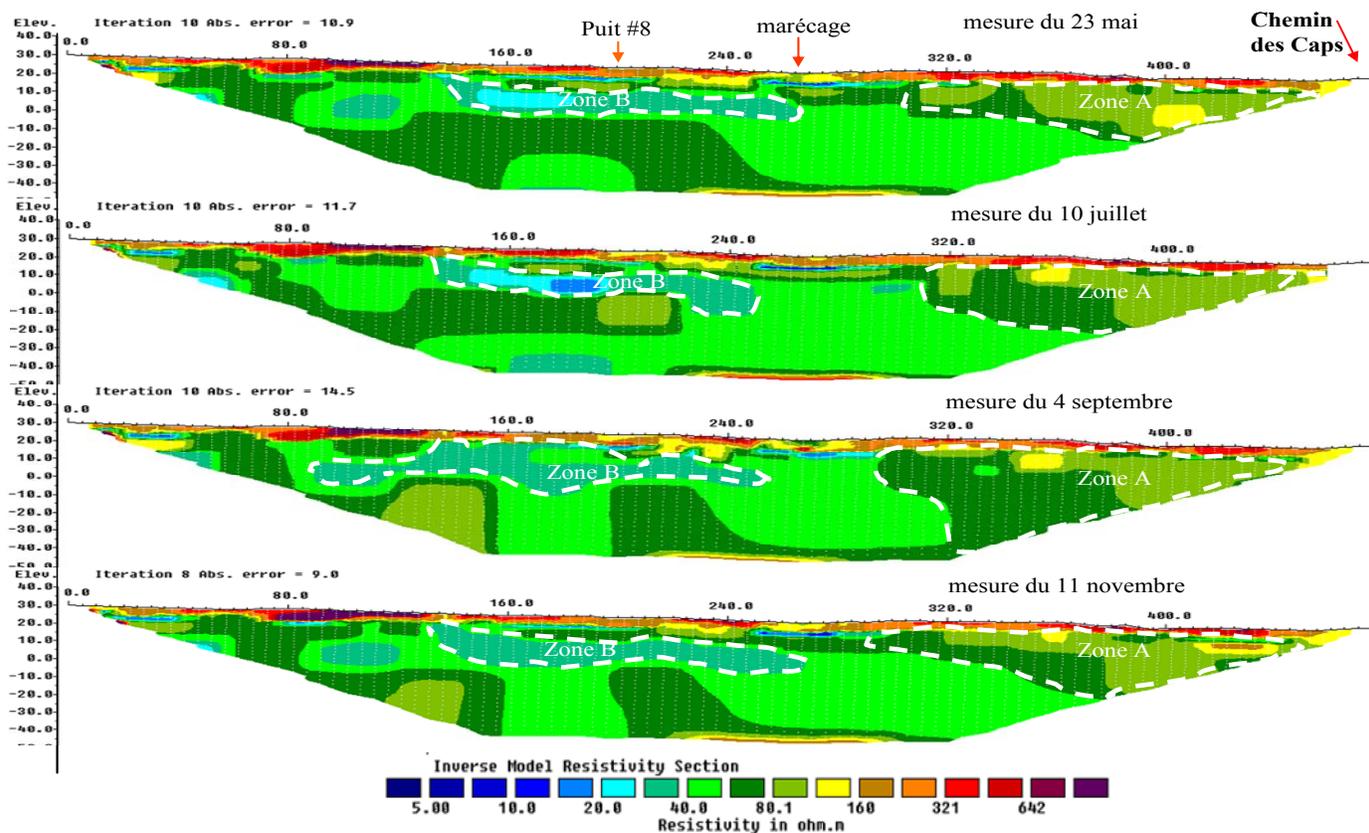


Figure 9 : Comparaison des quatre sections de résistivité électrique (FAT3), obtenues pour les quatre campagnes de mesure. Les données sont inversées en appliquant la même séquence de traitement.

La qualité des mesures inversées (figure 9) est assez moyenne. De nombreuses lectures ont été supprimées pour aider l'inversion à converger. Les sections de la figure 9 sont obtenues après la suppression des lectures que le programme a du mal à ajuster. Ainsi, les modèles de résistivité montrés dans la figure 9 sont obtenus après la suppression de 5.9 %, 5.7 %, 10.7 % et 3.9 % des 3375 données pour les quatre séries de mesures respectivement. L'analyse des quatre sections montre la présence d'une couche résistante en surface (500 Ω .m), d'une épaisseur d'environ 5 m, qui représente le mort-terrain. Directement sous cette couche résistante, on trouve l'unité géoélectrique la plus prépondérante, il s'agit de

l'aquifère gréseux avec une résistivité variant entre 30 Ω .m et 110 Ω .m. La variation de la résistivité dans l'aquifère est probablement liée à des variations de sa porosité. Les zones possédant des faibles porosités ne retiennent pas assez d'eau (zones résistantes) par rapport aux zones de porosité élevées (zones conductrices). La zone B (figure 9) montre une bande conductrice (40 Ω .m) à 15 m de profondeur entre le point 130 m et 230 m. Cette bande conductrice est liée à la présence d'un fossé d'eau usée qui passe à 10 m environ du côté est du profil. Cette zone contaminée pourrait avoir une forte porosité permettant ainsi de retenir l'eau qui s'infiltrée à partir de la surface. La taille de cette anomalie est demeurée pratiquement stable, au droit du profil, durant les quatre campagnes de mesure. On note aussi la présence d'une bande conductrice fine, entre les points 250 m et 290 m, à 18 m de profondeur. Cet endroit correspond également à un passage à travers une zone marécageuse, qui est fort probablement responsable de cette anomalie conductrice. La zone A montre une structure plus résistante (80 à 110 Ω .m) sur toute la profondeur étudiée, entre le point 310 m et le chemin des Caps. Les sections du profil FAT3 ne montrent pas des gros changements (au cours du temps) qui peuvent être expliqués comme des perturbations majeures dans le système aquifère (notamment la remontée de la zone de transition eau douce-eau salée). Les positions des électrodes ne restent pas fixes durant les quatre répétitions des mesures, une erreur de positionnement de ± 2.0 m (positionnement au GPS) est possible. Cela pourrait expliquer les faibles changements qui apparaissent entre les quatre sections, notamment en proche surface.

Au cours des 3^{ème} et 4^{ème} campagnes (enregistrements du 9 septembre et du 13 novembre) nous avons réalisé un levé, nommé « puits #8 », près du puits # 8 (voir figure 6 pour la localisation). La topographie le long de ce levé est très marquée, avec une différence d'altitude de plus de 18 m entre le début et la fin du profil. L'annexe III montre les points topométriques relevés le long du levé « puits # 8 ». Quelques endroits présentent des données de faible qualité (valeurs négatives et valeurs avec des écarts-type élevés). Ces endroits sont localisés entre les distances 100 m et 160 m et entre 230 m et 260 m du début du profil (cf. figure 10c). Les données sont inversées en considérant la topographie. La

figure 10a montre le résultat de l'inversion de la mesure réalisée le 9 septembre en supprimant toutes les valeurs négatives et les lectures qui convergent avec une erreur plus grande que 100 % (soit 9 % des 3375 données). On constate que les mesures sont reproduites par la réponse calculée avec une erreur quadratique moyenne modérée (12 %). La figure 10b montre la section obtenue par inversion du même levé pour la mesure réalisée le 13 novembre, après la suppression de tous les lectures négatives et celles qui se reproduisent avec une erreur plus de 100 % (soit 7.2 % des 3375 données). La figure 10c montre les zones où les données de faible qualité sont supprimées pour la mesure du 9 septembre.

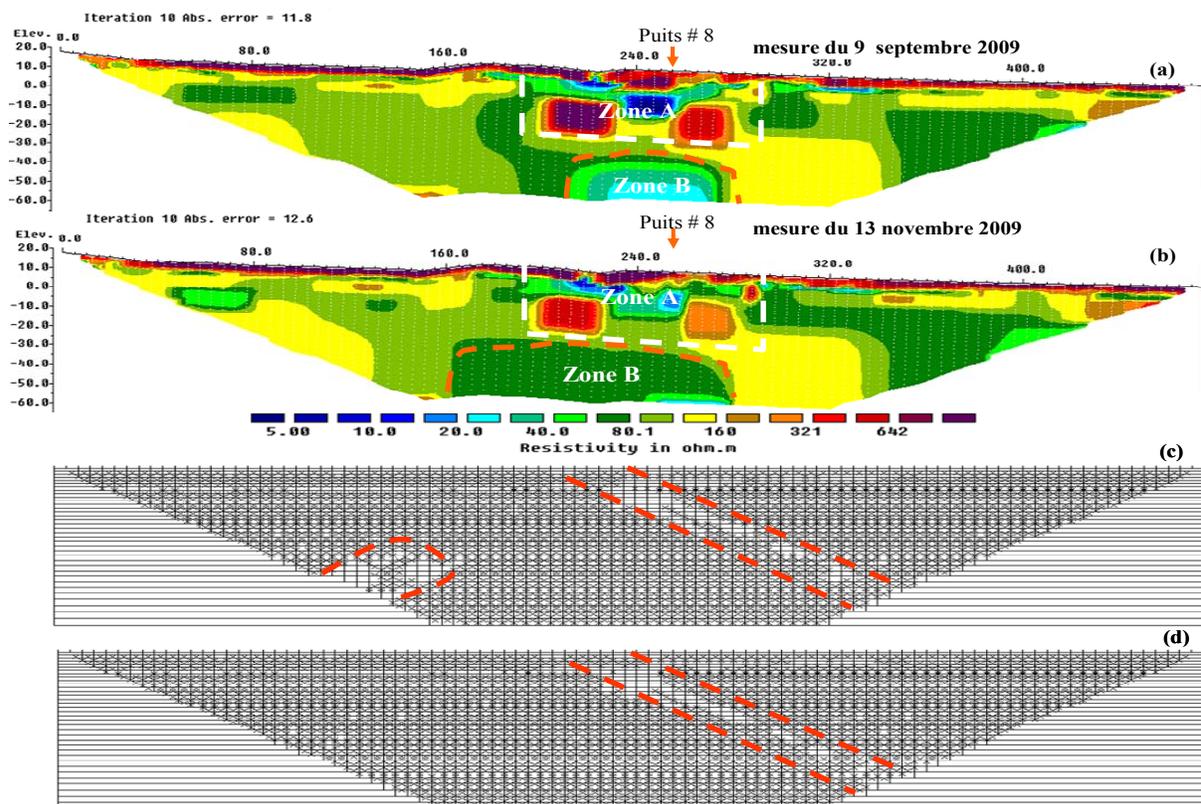


Figure 10 : Modèles de résistivité obtenus par inversion des mesures réalisées au niveau du levé « puits #8 », (a) mesures effectuées le 9 septembre, (b) mesures effectuées le 13 novembre, (c) localisation des zones où les données sont de faible qualité pour le levé du 9 septembre (d) localisation des zones où les données sont de faible qualité pour le levé du 13 novembre.

L'analyse de la figure 10 (a et b) montre la présence d'une couche résistive en surface d'une épaisseur d'environ 5 m. Cette couche, comme pour les autres levés décrits plus haut, représente le mort-terrain non saturé. Ce dernier est suivi d'une autre couche moins résistante ($160 \Omega.m$) avec une épaisseur d'environ 5 m. Sous cette couche on détecte l'aquifère gréseux avec une résistivité de $110 \Omega.m$. De part et d'autre du puits # 8, on constate la présence d'une anomalie assez compliquée (zone A, figure 10 a et b) qui est probablement liée à la présence des installations (conduites?) associées au puits. De plus, la faible densité et la qualité moins bonne des données rendent l'interprétation moins sûre pour cet endroit. La zone B (figure 10a) montre une anomalie plus conductrice ($30 \Omega.m$ à $60 \Omega.m$) à 40 m de profondeur. Cette anomalie conductrice est possiblement liée à la remontée de l'eau saumâtre suite au pompage. La mesure du mois de novembre montre que la taille et l'intensité de cette anomalie sont réduites. Ce changement pourrait être expliqué par un début du retour à l'équilibre après une possible diminution de la consommation d'eau au cours du mois de novembre. Mise à part cette variation minimale au droit du puits, les deux mesures (de septembre et novembre) montrent sensiblement la même distribution de résistivité.

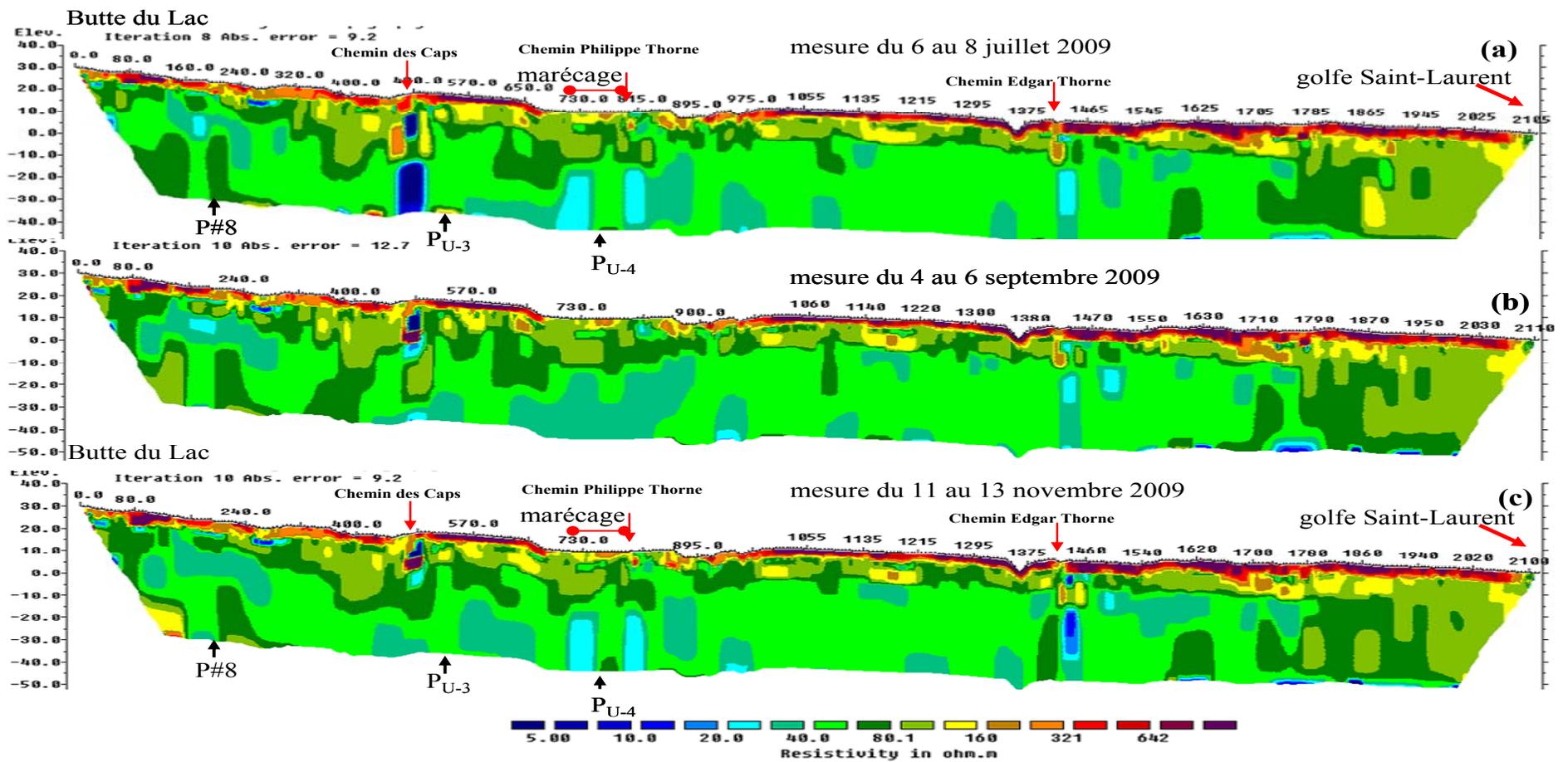


Figure 11 : Modèles de résistivité obtenus par l'inversion des mesures acquises sur le levé de Fatima, (a) mesures réalisées entre le 6 et le 8 juillet (b) mesures réalisées entre le 4 et le 6 septembre (c) mesures réalisées entre le 11 et le 13 novembre.

Les positions des puits, dans la figure 11, sont données à titre indicatif. En effet, elles représentent les projections des puits sur le profil. La distance moyenne entre les puits et le levé est d'environ 100 m. Les deux portions au sud (0 - 475 m) et au nord (1640 m - 2115 m) sont déjà décrit respectivement dans les figures 6 et 4. Les modèles finaux présentés dans la figure 11 sont obtenus après la suppression des mesures négatives et de celles que le programme a du mal à ajuster. Ainsi, nous avons éliminé respectivement environ 10 %, 9.5 % et 4.3 % pour les trois séries de mesure. Les données sont inversées en utilisant une topographie qui n'est pas assez précise sauf pour la dernière campagne (novembre 2009) où nous avons considéré celle obtenue du levé topométrique. L'inversion des autres mesures, avec la topographie mise à jour, sera donnée dans le rapport final.

L'analyse de la figure 11 montre la présence d'une couche résistante ($500 \Omega.m$ à $600 \Omega.m$) qui représente le mort-terrain non-saturé, avec une épaisseur d'environ 5 m. Ce mort-terrain devient plus conducteur au niveau des marécages traversés (notamment au sud du chemin des Caps). L'unité géoélectrique détectée après le mort-terrain est une couche plus conductrice ($110 \Omega.m$ à $160 \Omega.m$) qui indique probablement la partie supérieure (faiblement saturée) de l'aquifère. L'épaisseur moyenne de cette couche est d'environ 10 m et augmente entre les points 400 m et 900 m à plus de 20 m. En dessous de la partie non saturée, on détecte la formation géologique la plus prépondérante. Il s'agit probablement de l'aquifère gréseux (nappe d'eau douce) avec une résistivité moyenne de l'ordre $55 \Omega.m$. À l'intérieur de cette formation on repère quelques endroits avec des résistivités plus faibles ($40 \Omega.m$), particulièrement entre les points 470 m et 970 m. Cette partie du levé est proche des puits PU-3 et PU-4 et laisse supposer un possible remontée de la zone de mélange (eau douce-eau salée) à cause du pompage. En dessous des chemins traversés, on constate la présence de quelques anomalies conductrices qui peuvent être liées à l'infiltration en surface de l'eau salée (produit par les déglaçages des routes). Cependant, cette interprétation est à prendre avec précaution à cause de la faible densité des données sous les routes (électrodes non installées au niveau des chemins).

La comparaison des trois sections de résistivité (figure 11a, 11b et 11c) montre que les principales structures sont mises en évidence lors des trois campagnes. On note aussi l'absence de changements remarquables (entre les trois levés) qu'on pourrait interpréter comme des variations dans le système aquifère. Les changements mineurs observés occasionnellement peuvent être liés simplement aux modifications des positions des électrodes entre les trois campagnes de mesure. Ils peuvent être liés aussi au processus d'inversion sachant que l'édition des données n'est pas forcément la même (les lectures aberrantes pour le 1^{er} levé ne sont pas forcément les mêmes pour les autres levés).

. Traitement et interprétation des mesures du secteur de l'Étang-du-Nord

La figure 12 montre le tracé du profil de résistivité électrique (en coordonnées MTM NAD83) réalisé dans le secteur de l'Étang-du-Nord. Ce profil commence sur le bord du golfe du Saint-Laurent au point GPS 125 et se termine au sud de la route 199 au point GPS 205. La longueur totale du profil est de l'ordre de 2400 m, et traverse deux routes qui sont respectivement le chemin du Gros-Cap et le chemin Turbide. Ceci nous a obligé de ne pas brancher l'électrode #34 au niveau du chemin du Gros-Cap et les électrodes #137 et # 138 au niveau du chemin Turbide. Le relief le long de ce levé est assez prononcé. L'annexe 4 montre les coordonnées des points GPS pris le long du profil.

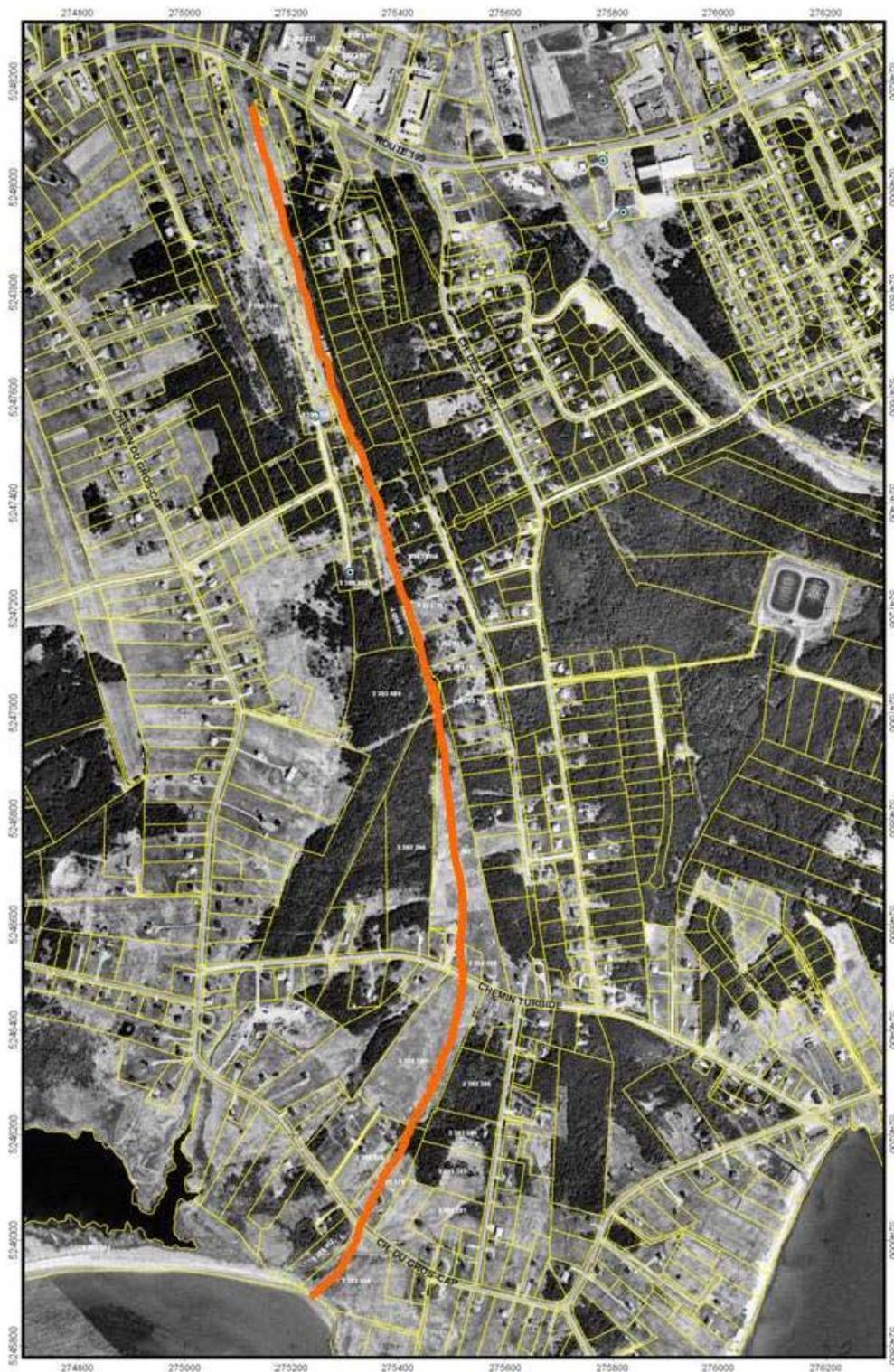


Figure 12 : Localisation du profil réalisé sur le secteur de l'Étang-du-Nord

La figure 14 montre le résultat des mesures sur une première portion d'une longueur de 475 m au début du profil de l'Étang-du-Nord (à proximité du golfe du Saint-Laurent). Au cours de la première campagne de mesures (mai 2009) cette portion a été réalisée au début des mesures, lors des tests, à l'aide d'une séquence d'acquisition composée de 16 niveaux et 20 m de profondeur d'investigation. Lors de la 3^{ème} campagne de mesures (septembre 2009), nous avons réalisé un levé avec un espacement unitaire de 1.5 m. L'objectif de ce levé consistait à déterminer les structures superficielles situées près de la mer avec plus de résolution. Les données sont de qualité moyenne, de nombreuses lectures ont été supprimées afin d'aider le programme à se converger. Ainsi, nous avons supprimé 3.8 %, 14.5 %, 13% et 9.75 % respectivement pour les quatre séries de mesures. Cela sans compter les mesures relatives à l'électrode située au niveau de la route. Les lectures supprimées sont pratiquement les mêmes pour les trois dernières séries de mesure et sont localisées aux mêmes endroits comme le montre la figure 13. Ces endroits incluent probablement des installations enfouies qui distordent les lignes de courants.

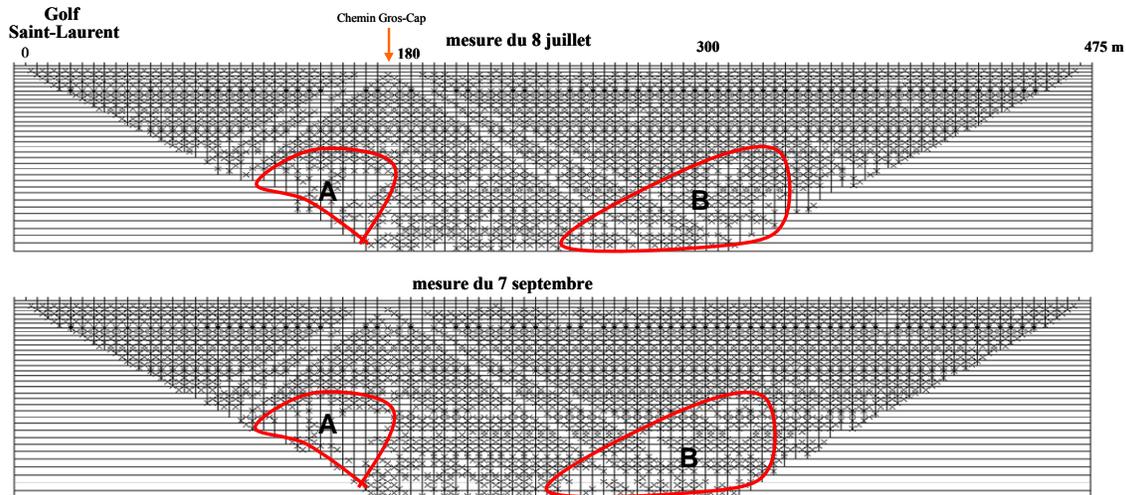


Figure 13 : Zones montrant les données, négatives et de faible qualité, que nous avons éliminées pour aider le programme à améliorer l'ajustement.

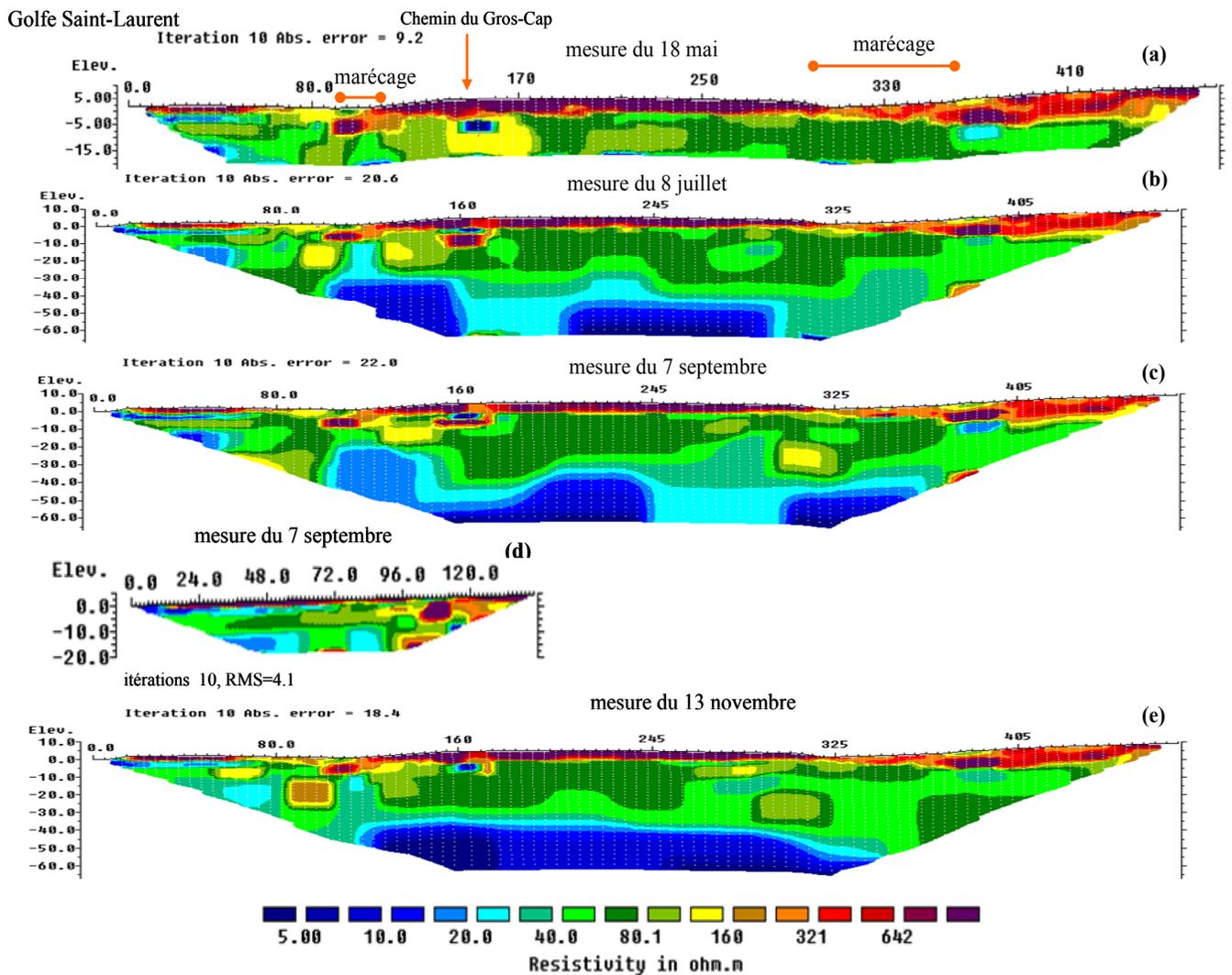


Figure 14 : Modèles de résistivité obtenus d'inversion de la première portion du profil de l'Étang-du-Nord pour les quatre campagnes de mesures.

L'analyse des sections de résistivité de la figure 14 montre la présence d'une couche résistante ($600 \Omega.m$) en surface sur une profondeur d'environ 5 m. Cette formation résistante représente le mort-terrain non saturé en surface. Cette couche devient plus

conductrice au niveau des marécages traversés et sur les premiers 15 m, dans les sables saturés de Saint-Laurent. La 2^{ème} unité géoélectrique détectée est une couche moins résistante (60 Ω .m à 80 Ω .m) et représente l'aquifère d'eau douce avec une épaisseur d'environ 30 m. Cette dernière inclut parfois des anomalies plus conductrices, notamment celle observée au point 385 m, qui est due à l'infiltration de l'eau usée accumulée dans un marécage en surface. Deux autres bandes conductrices sont repérées du côté de la mer et pourraient représenter l'intrusion de l'eau salée de la mer dans des couches perméables. Ces anomalies sont confirmées à l'aide des mesures effectuées avec l'écartement de 1.5 m (figure 14d). Une autre anomalie conductrice apparaît également sur le chemin du Gros-Cap et peut être liée à l'infiltration de l'eau salée issue du déglacage de la route. Cependant, la faible densité des données (perte des mesures relatives à l'électrode située au niveau du chemin) sous la route rend l'interprétation de cette partie plus incertaine. En profondeur (environ 30 m), on découvre la présence d'une couche conductrice (moins de 40 Ω .m) qui s'étend sur toute la profondeur étudiée, le long de tout le profil. La chute de résistivité de cette couche est probablement liée à l'intrusion de l'eau salée de la mer dans l'aquifère. La comparaison des sections issues des quatre répétitions de mesure ne montre pas de changements remarquables sur l'ensemble de la profondeur étudiée, les principales structures apparaissant sur les quatre sections. Cela vient renforcer le degré de confiance dans le modèle géoélectrique déduit pour cette portion. Comme dans le cas des mesures précédentes, les changements mineurs observés par endroits sont probablement liés aux erreurs relatives de position des électrodes (les électrodes sont réinstallées aux mêmes positions à ± 2.0 m au cours des quatre campagnes de mesures). L'autre origine possible pour ces changements se représente dans le processus d'édition (les lectures aberrantes pour une mesure ne sont pas forcément les mêmes pour la mesure subséquente).

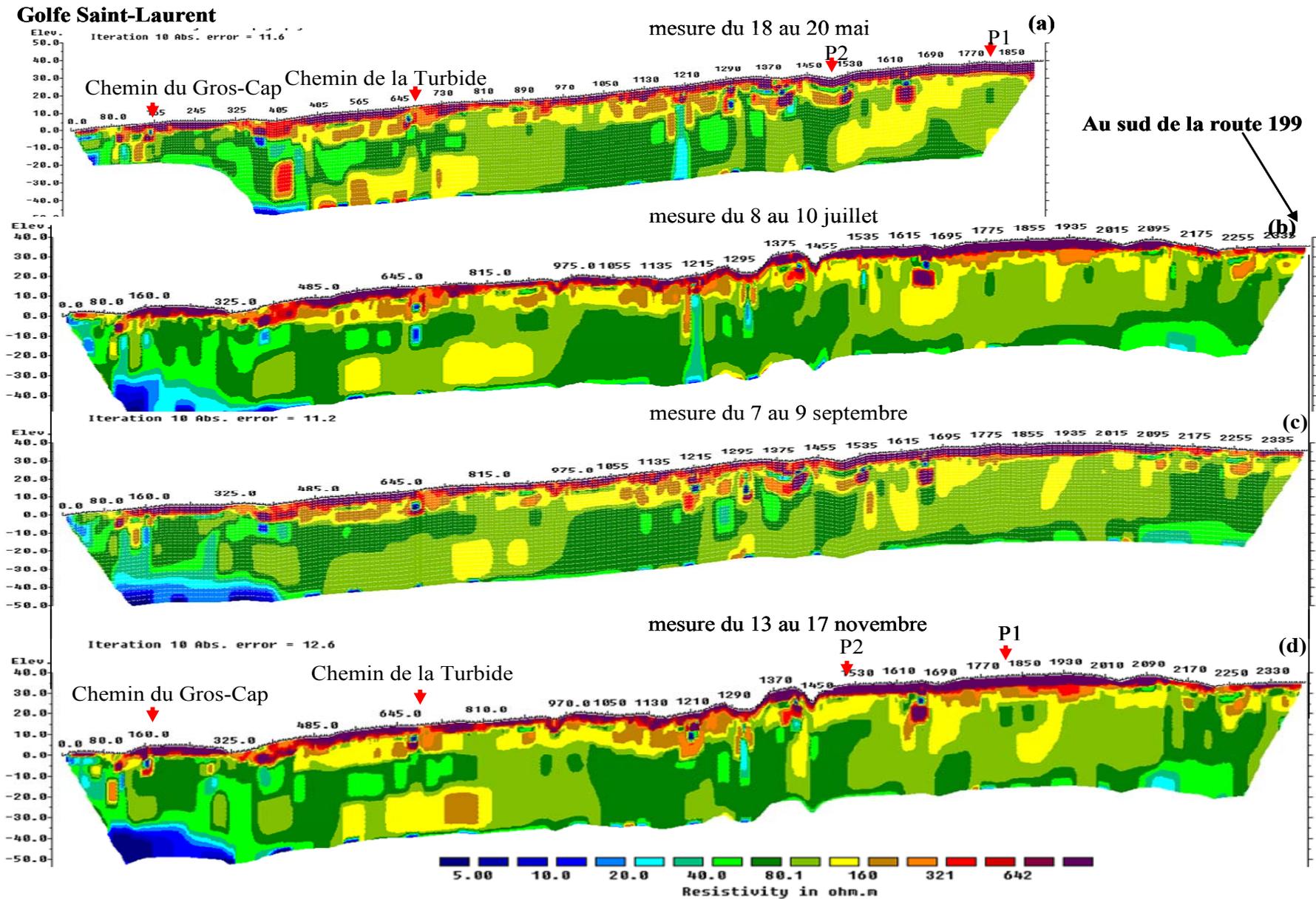


Figure 15 : Modèles obtenus par l'inversion des données acquises sur le levé de l'Étang-du-Nord pendant les quatre campagnes de mesures

La figure 15 montre les modèles de résistivité, calculés par inversion, à partir des séries de mesures effectuées lors des quatre campagnes différentes le long du profil de l'Étang-du-Nord. Les positions des puits, dans la figure 15, sont données à titre indicatif. En effet, elles représentent les projections des puits sur le profil. La distance moyenne entre les puits et le levé est d'environ 50 m. La portion au sud (0 à 470 m) et déjà décrite dans la figure 14.

L'analyse des modèles de résistivité montre la présence d'une couche résistante en surface (plus de 600 $\Omega.m$) avec une épaisseur d'environ 5 m. Cette couche représente le mort-terrain non saturé. La deuxième couche détectée est plus hétérogène avec une épaisseur d'environ 15 m et une résistivité variant entre 100 $\Omega.m$ à 600 $\Omega.m$. Elle représente probablement la partie supérieure de l'aquifère, composée des unités géologiques avec différentes porosités et degré de saturation. La troisième unité géoélectrique détectée est plus conductrice (100 $\Omega.m$) et elle s'étend sur toute la profondeur étudiée (<50 m). Cette couche représente probablement l'aquifère gréseux plus saturé. Quelques endroits dans cet aquifère présentent des anomalies plus résistives (160 $\Omega.m$) comme, par exemple, l'anomalie (en jaune) située entre le point 550 m et 830 m (figures 12a et 12b). D'autres endroits présentent des anomalies plus conductrices (< 60 $\Omega.m$) comme, par exemple, celle située vers la fin du profil entre le point 2000 m et 2250 m (figures 12b et 12c). Ces zones conductrices sont probablement plus saturées ou présentent une proportion appréciable d'argile.

Comme dans le cas des mesures réalisées dans le secteur de Fatima, les mesures de L'Étang-du-Nord ne montrent pas des changements significatifs au cours du temps qu'on pourrait associer à des variations de qualité de la nappe. Les changements mineurs repérés par endroits sont probablement liés aux modifications des positions des électrodes d'une campagne à l'autre, et l'édition des mesures (les lectures aberrantes pour une campagne de mesures ne sont pas forcément les mêmes pour les autres campagnes de mesures).

Étude de faisabilité des méthodes électromagnétiques transitoires (TDEM)

Pour pallier le manque de pénétration de la méthode électrique (et aussi certains problèmes d'équivalence menant à des ambiguïtés d'interprétation), nous avons étudié par simulation la capacité des sondages électromagnétiques (EM) à déterminer avec précision l'interface eau douce-eau salée. Ces sondages EM permettent d'estimer la distribution des résistivités électriques sur une grande profondeur par la mesure du champ magnétique secondaire générée par induction dans le matériau. Cette profondeur d'investigation dépend des facteurs principaux suivants : la plage d'enregistrement dans le temps des champs secondaires, le produit du courant injecté dans la boucle émettrice par la taille (en m²) de cette boucle, et de la distribution des résistivités électriques dans le sol. Si cette dernière est inconnue, on peut cependant optimiser les deux premiers pour obtenir la profondeur suffisante. La méthode TDEM est très indiquée pour mettre en évidence les couches conductrices; par contre elle souffre de cécité pour détecter les zones résistantes. Les méthodes électriques étant aussi sensibles aux zones conductrices que résistantes, la combinaison des deux méthodes, électrique et TDEM, permet de mieux résoudre la distribution des résistivités de l'aquifère mais aussi d'obtenir une investigation plus importante.

. Principe de la méthode TDEM

La technique TDEM est une méthode de sondage électromagnétique. Elle permet d'étudier le sous-sol à l'aide de l'induction électromagnétique produite par la coupure brutale d'un champ magnétique statique établi en surface. Ce champ magnétique est généré à l'aide d'une boucle de câble déployée à la surface dans laquelle on fait circuler un courant électrique (figure 16a, en rouge). Le courant est injecté sous la forme d'une onde créneau (figure 16b). Des contraintes physiques et instrumentales font que la montée et la descente ne sont pas instantanées. On définit le temps de montée du signal à sa valeur nominale par le «Turn-on-time» et le temps que met le courant pour s'annuler, lorsque coupé, par le «Turn-off-time». Lorsque le champ magnétique primaire (courant injecté) est coupé

brutalement, les courants de Foucault sont instantanément générés près du cadre de l'émetteur de manière à maintenir le champ magnétique partout dans le sol à la valeur qui existait avant la coupure (figure 16a, en bleu). Ces boucles de courants diffusent en profondeur, leurs rayons augmentant avec le temps. L'image de diffusion des courants de Foucault peut être associée à des ronds de fumée (Nabighian, 1979).

La vitesse, la profondeur, ainsi que le rayon, caractérisent les filets de courant à un instant t sont donnés par les relations suivantes (Nabighian, 1979) :

$$V = \frac{2}{\pi\mu\sigma t} \quad (9)$$

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{4t}{\sigma\mu}} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{\frac{4.37t}{\sigma\mu}} \quad (11)$$

avec

σ : conductivité électrique (Siemens/m);

μ : perméabilité magnétique.

Ces boucles de courant créent à leur tour un champ magnétique secondaire (suivant la loi d'Ampère) enregistré à la surface du sol soit à l'aide de la même boucle (dispositif coïncident) soit à l'aide d'une boucle réceptrice plus petite placée au centre (figure 16a en bleu) ou à l'extérieur de la boucle d'émission (dispositif central ou dispositif avec déport latéral). Le champ secondaire décroît dans le temps; plus le temps considéré est grand, plus l'information obtenue est profonde. L'étude de la forme de la décroissance du champ magnétique secondaire en fonction du temps permet de déterminer la résistivité du sol en fonction de la profondeur.

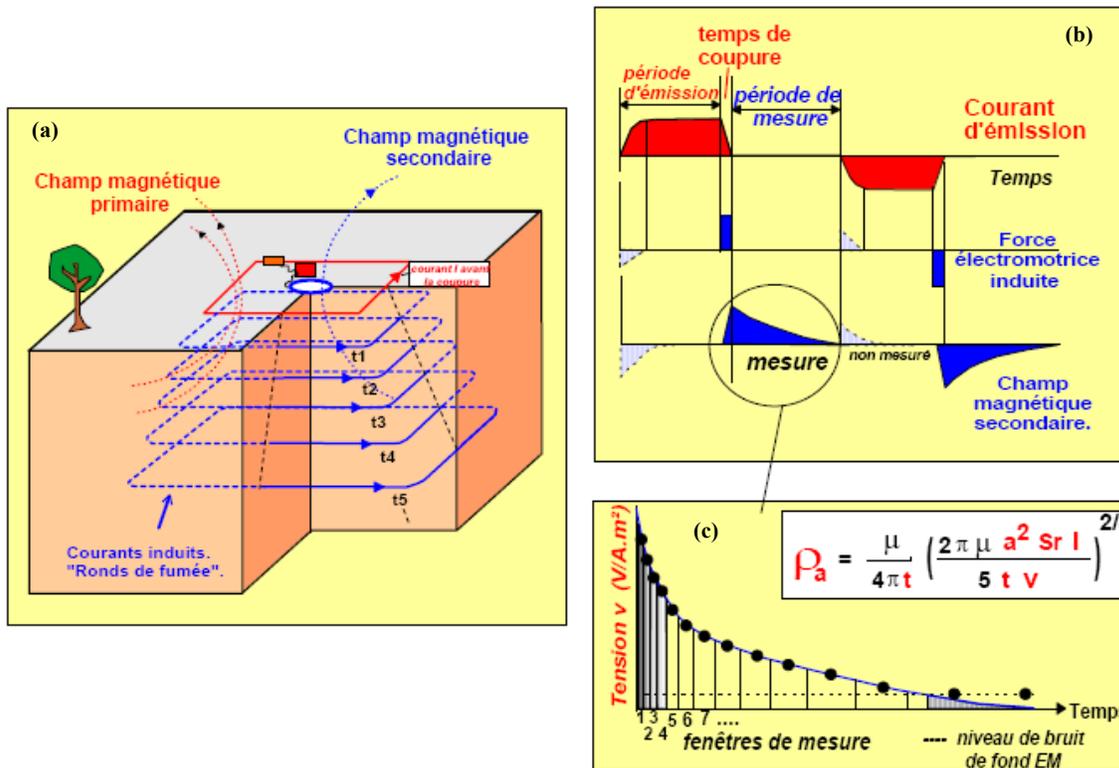


Figure 16 : Principe de la méthode TDEM. (a) Diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure du courant injecté; (b) Forme de l'onde de courant injectée avec la force électromotrice générée dans le sol lors de la coupure du courant; (c) Illustration de l'échantillonnage du signal mesuré (adapté de McNeil, 1990)

À cause du passage rapide des courants de Foucault à travers les milieux résistants, la méthode TDEM n'est pas sensible aux couches résistantes. Cependant, elle est très sensible aux terrains conducteurs et à la position de leurs interfaces supérieures (toits) et les définit de façon meilleure que les sondages électriques. En approximation temps tardif (ou "Late time" en anglais), la relation entre la dérivée du champ magnétique secondaire, la résistivité (inverse de la conductivité) et le temps est donnée par la relation suivante (Fitterman et Stewart, 1986) :

$$\rho_{app} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\pi\mu_0 a^2 S a I}{5 t V} \right)^{2/3} \quad (2.13)$$

avec

ρ_{app} : résistivité apparente mesurée à la surface ($\Omega.m$);

a : côté de la boucle d'émission (m);

S_a : surface de la boucle de réception (m^2);

I : courant injecté (A);

V : voltage induit dans la boucle de réception (V);

σ : conductivité électrique (Siemens/m)

En sondage TDEM, on mesure la variation de la résistivité en fonction du temps. Dans le cas où le sous-sol est formé de couches de résistivités différentes, la résistivité mesurée est une résistivité apparente dont la valeur dépendra de la profondeur de pénétration des courants de Foucault au temps considéré.

. Simulations des sondages TDEM

Ces simulations sont effectuées pour vérifier la sensibilité de la méthode TDEM au modèle du sous-sol des Îles-de-la-Madeleine et aux variations possibles de ce modèle. Les simulations sont conduites à l'aide du logiciel EMMA, développé par le groupe d'Hydrogéophysique de l'université d'Aarhus (Danemark). Cet outil permet l'estimation des paramètres d'acquisition qui conduisent à une meilleure détermination d'un modèle du sous-sol donné. La fenêtre temporelle d'enregistrement adoptée est celle du système Geonics TEM47 (appareil qui sera utilisé pour les mesures sur le terrain). Le modèle de l'aquifère considéré est celui déduit à l'aide des mesures électriques.

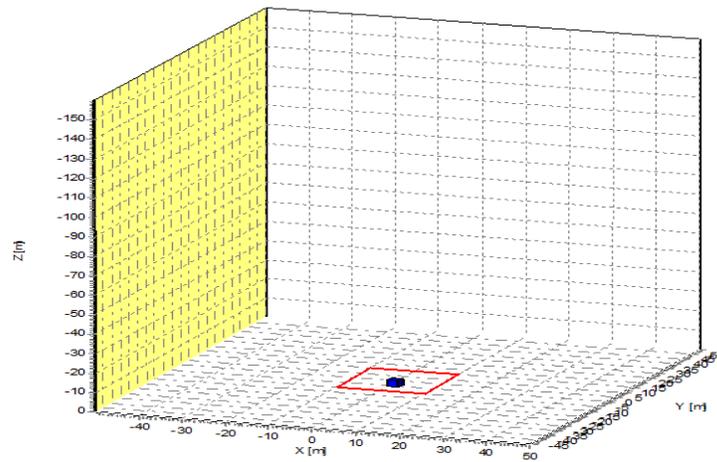


Figure 17 : Configuration centrale utilisée avec une boucle de transmission carrée (20 m x 20m) et une bobine réceptrice en bleu au centre pour la mesure de dB/dt

Tableau 4 : Propriétés des modèles considérés dans la simulation TDEM avec l'interface eau douce/eau salée à différentes profondeurs

Modèles	résistivité couche 1 ($\Omega.m$)	épaisseur couche 1 (m)	résistivité couche 2 ($\Omega.m$)	épaisseur couche 2 (m)	résistivité couche 3 ($\Omega.m$)
(1)	600	5	80	25	5
(2)	600	5	80	35	5
(3)	600	5	80	45	5
(4)	600	5	80	55	5
(5)	600	5	80	65	5

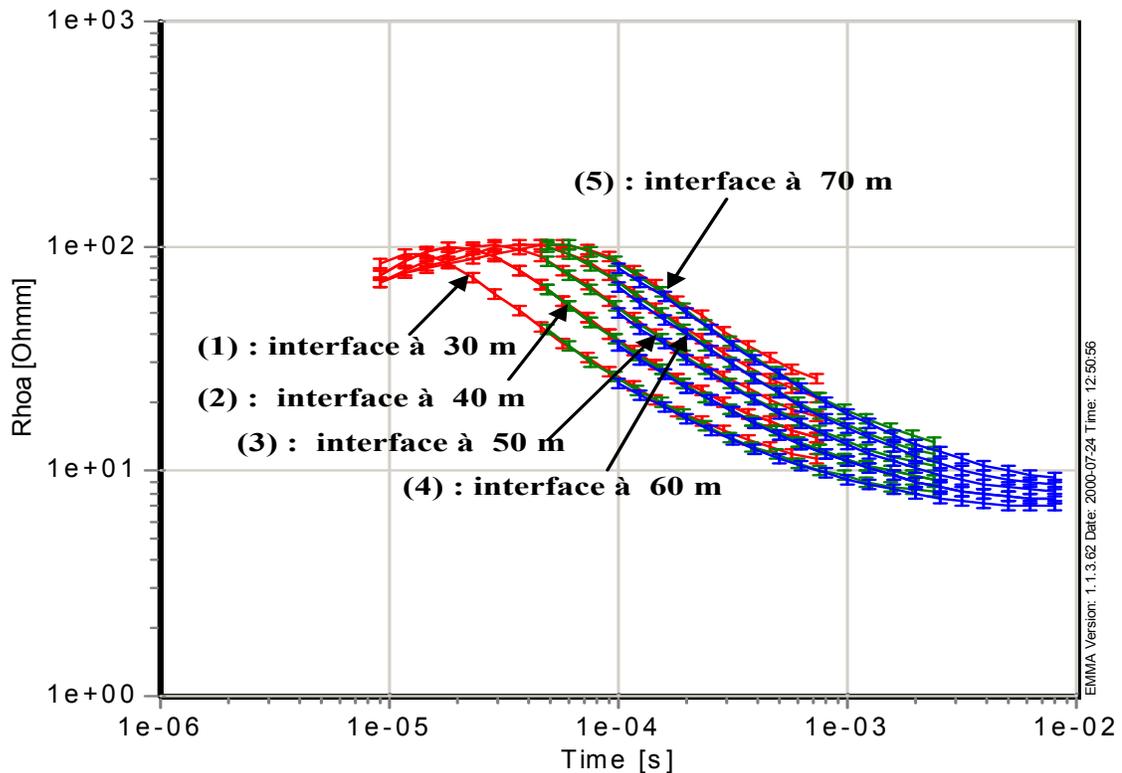


Figure 18 : Réponses TDEM des modèles de sous-sol considérés pour les Îles-de-la-Madeleine (tableau 4). La configuration centrale est adoptée pour cette simulation, avec une boucle de transmission carrée de 20 m de côté.

On voit que la réponse de la résistivité apparente en fonction du temps est sensible à l'interface eau douce/ eau salée pour l'intervalle de temps ($2 \cdot 10^{-5} \text{ s} < t < 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$). Aux temps longs (plus de $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}$), toutes les réponses convergent vers la résistivité de la couche conductrice en profondeur (aquifère d'eau salée).

Suite à une rencontre le 23 mars 2010 aux bureaux du MDDEP, il a été décidé de mettre davantage l'emphase sur les sondages TEM pour détecter l'interface eau douce-eau salée au-delà de la profondeur maximum de 70 m des tomographies électriques. Une nouvelle série de simulations a été réalisée pour des plus grandes profondeurs, variant de 105 m à 205 m, tout en conservant les mêmes résistivités pour les couches 1, 2 et 3 et la même

épaisseur (5 m) pour la couche 1 non saturée. La figure 19 montre les résultats pour les profondeurs à l'interface eau douce-eau salée de 105 m et de 205 m respectivement obtenue pour une boucle de transmission de 100 m x 100 m.

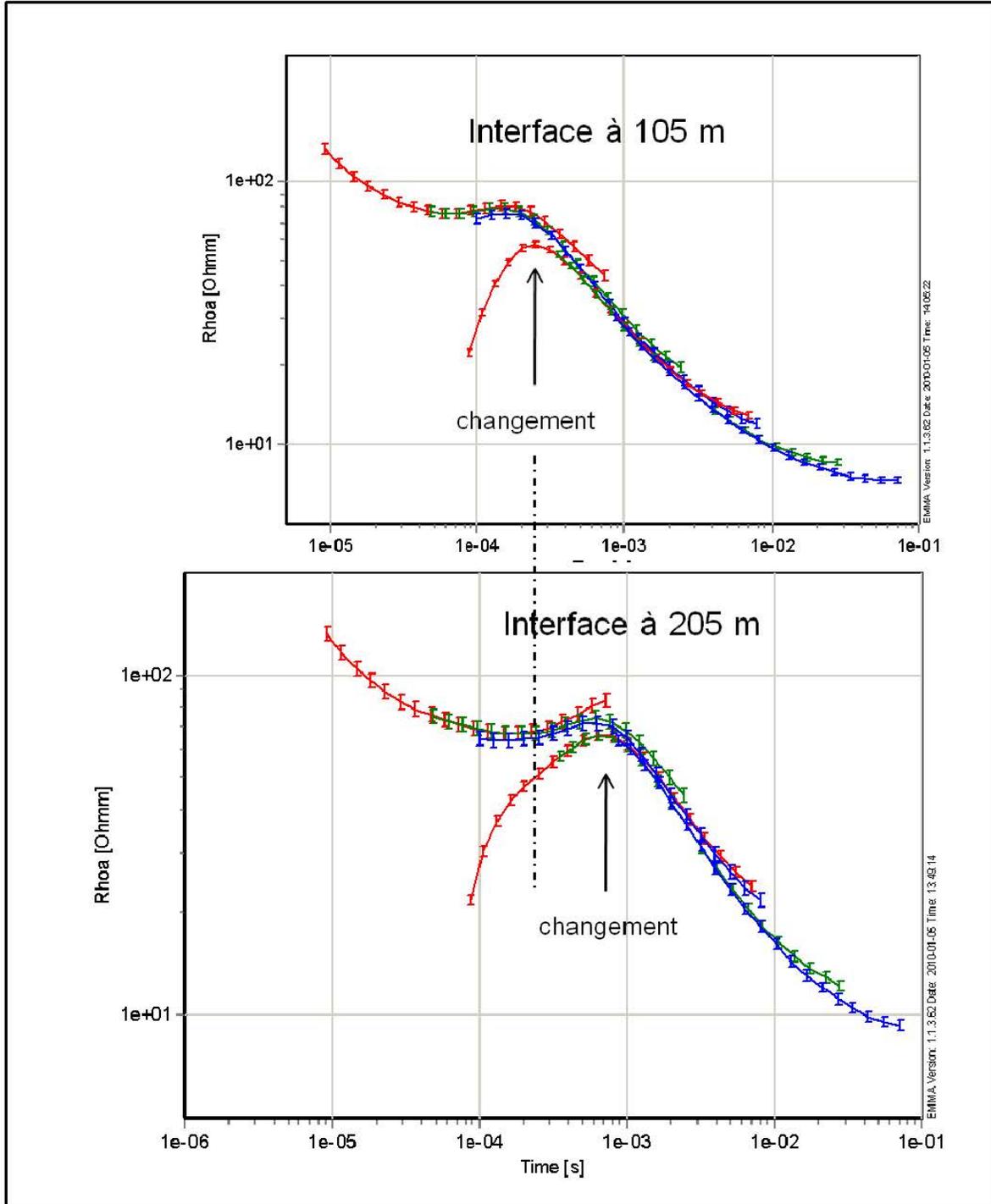


Figure 19 : réponses TEM pour des interfaces eau douce-eau salée à 105 et 205 m. Les trois premières bandes de données (temps courts) correspondent aux données prises avec le TEM47 alors que les trois bandes suivantes (temps plus longs) correspondent à celles prises avec le TEM57.

On constate tout d'abord qu'il faut utiliser une plage de mesure en temps de 10^{-5} s (10 μ s) à 10^{-2} s (10 ms) au moins pour résoudre la profondeur à l'interface. C'est le déplacement vers des temps plus longs du changement de pente de la courbe qui correspond à des profondeurs croissantes.

Suite à cette modélisation, nous avons convenu avec les représentants du MDDEP, Michel Ouellet et Diane Myrand, de réaliser 2 campagnes de mesure TEM pour valider l'approche et vérifier que l'on puisse bien déterminer l'interface eau douce-eau salée avec les équipements disponibles et les limitations d'accès.

Mesures TEM

Deux missions de terrain ont eu lieu aux îles de la Madeleine : du 10 mai au 15 mai et du 8 juin au 15 juin 2010. L'équipement utilisé était composé d'un récepteur universel Protem D (Geonics Ltd.), de deux transmetteurs, un TEM 47 (Geonics Ltd.) pour les premiers 30-100 m et un TEM57 (Geonics Ltd.) pour les profondeurs supérieures à 40 m. Deux bobines réceptrices ont été utilisées, chacune adaptée pour la gamme des profondeurs du TEM 47 et du TEM57 respectivement.

Dans la mesure du possible, nous avons essayé d'installer des boucles de transmission de 100 m x 100 m, mais en de nombreuses occasions les endroits dégagés étaient trop petits pour y déployer cette taille de boucle et il fallu utiliser des boucles de 50 m x 50 m avec 2 tours de câble. En moyenne, des courants de 1 à 2.5 A ont été utilisés avec le TEM47 et des courants de 13.5 à 18 A avec le TEM57.

Au total des deux missions, 24 sondages TEM ont été réalisés : 16 sur ou près du profil électrique d'Étang-du-Nord et 8 à proximité du profil électrique de Fatima. On trouvera à la figure 20 la position de ses sondages TEM. Les coordonnées (latitude, longitude) sont

listées à l'annexe 6. Ces coordonnées sont précises à ± 12 m en moyenne (précision du GPS utilisé). Il est à noter que les altitudes des sites TEM ne sont pas connues avec assez de précision et que les interprétations ne seront pas corrigées pour les variations d'altitude.





Figure 20 : position des sondages TEM sur les profils Étang-du-Nord et Fatima. Les icônes jaune (EDN) et orange (Fatima) indiquent les positions des forages existants.

Les sondages ont été interprétés à l'aide du logiciel WinGlink (Geosystems). Le logiciel permet d'interpréter les sondages réalisés soit sous forme d'une multitude de couches (en général, de 12 à 20) présentant des variations graduelles de la résistivité électriques avec la profondeur, soit sous forme de quelques couches (en général, de 4 à 6) présentant des contrastes marqués de résistivité. La première approche est intéressante dans les environnements où la résistivité varie de manière progressive, comme celle qui pourrait y avoir pour une eau interstitielle dont la salinité varie graduellement; la seconde approche nous permet de mieux identifier des interfaces marquées comme celle existant entre l'eau douce et l'eau salée. Dans le cas d'une zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée, cette interface est plus graduelle et la solution se situe entre les deux approches. Aux figures 21 et 22, on montre les exemples d'interprétation sous les deux approches pour la station Etan03 pour le sondage utilisant le TEM47 et pour celui utilisant le TEM57.

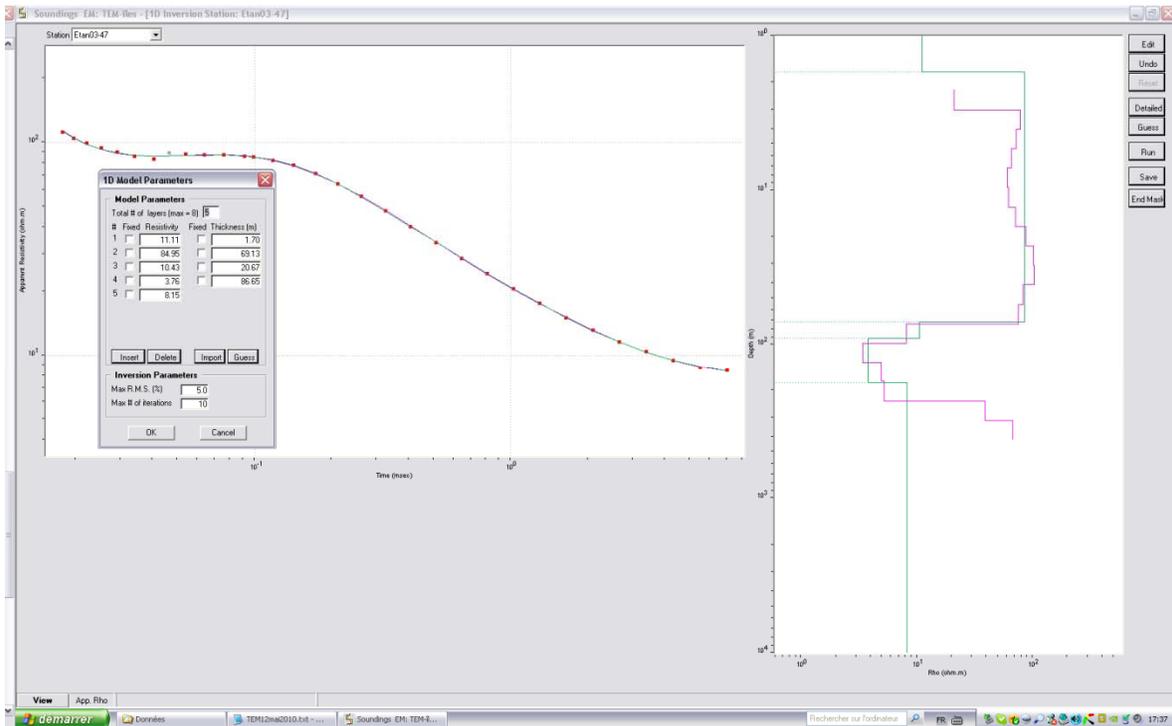


Figure 21 : interprétation du sondage Etan03 à partir des données acquises en utilisant le TEM47. La courbe rose correspond à l'interprétation sous forme de résistivité graduelle; la courbe verte correspond à l'interprétation sous forme de couches présentant des contrastes de résistivité marqués. Les résistivités et épaisseurs des couches pour cette approche sont indiquées dans l'encadré.

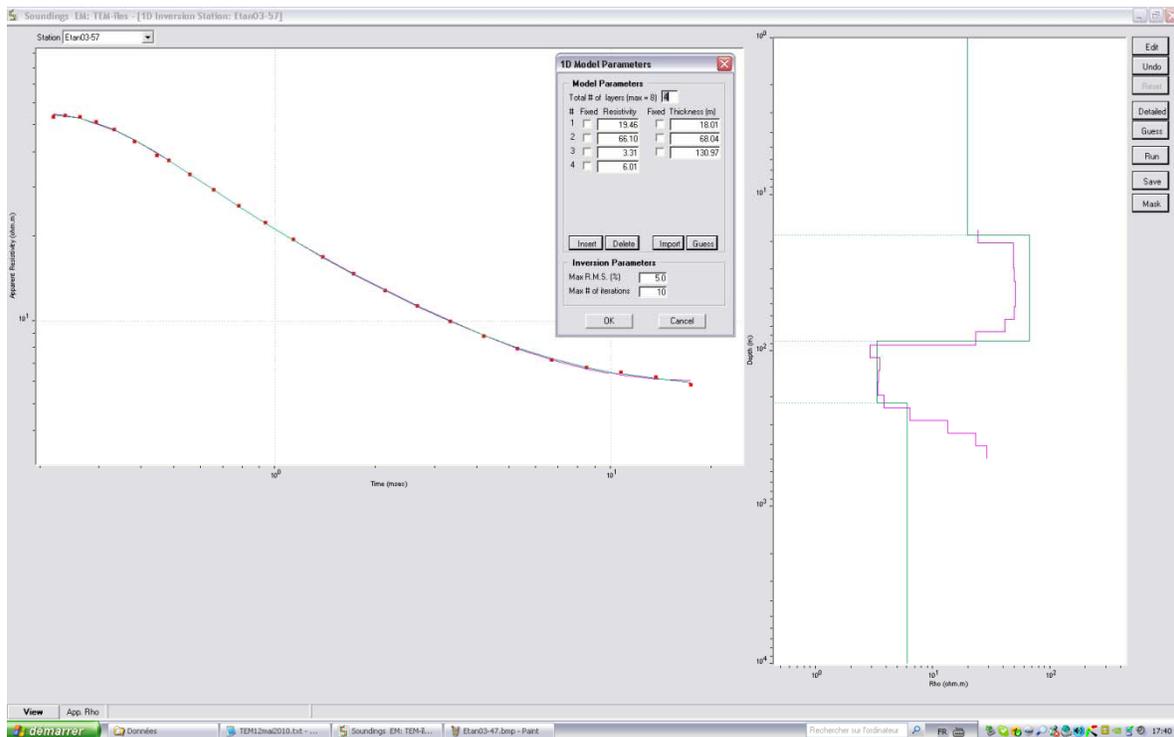


Figure 22 : interprétation du sondage Etan03 à partir des données acquises en utilisant le TEM57. La courbe rose correspond à l'interprétation sous forme de résistivité graduelle; la courbe verte correspond à l'interprétation sous forme de couches présentant des contrastes de résistivité marqués. Les résistivités et épaisseurs des couches pour cette approche sont indiquées dans l'encadré.

Pour la station Etan03, que ce soit pour les données associées au TEM47 ou au TEM57, on trouve l'eau salée (résistivité de 4 Ω .m) à une profondeur de \sim 89 m. Au-dessus, une zone de mélange d'environ 10 m à 10 Ω .m fait le tampon avec la couche aquifère d'eau douce de 60-80 Ω .m. Il est à noter que l'épaisseur et la résistivité réelle de la zone de mélange n'est pas bien déterminée par l'inversion des données.

Tous les sondages TEM ont été interprétés de cette manière et les résultats combinés selon des sections de résistivité avec la profondeur. Les figures 23 et 24 représentent respectivement les profils d'Étang-du-Nord et de Fatima. Pour le profil de Fatima, une station TEM a été ajoutée au sud-est du profil à quelques x km à l'est du profil électrique

pour vérifier la variation latérale de l'intrusion d'eau saline. Cette station a été projetée sur le profil (station Fat04j) pour fins de comparaison mais il est important de rappeler qu'elle n'est pas physiquement située sur le profil (figure 25).

Sur toutes les figures, la zone d'eau salée est représentée par une zone de résistivité entre 2 et 5 Ω .m de couleur violette à bleu foncé alors que les zones résistives sont en orange-rouge. Le fond en couleur de la section est créé à partir de l'interpolation des résultats des sondages en couches de résistivités graduelles alors que les colonnes représentent l'interprétation sous forme de quelques couches de résistivités contrastées.

1.1 Profil TEM d'Étang-du-Nord :

La figure 23 montre une zone inclinée de faible résistivité (<5 Ω .m) à pendage vers le nord commençant au droit de la plage d'Étang-du-Nord. La limite supérieure se situe à 35-40 m sous la station Etan01 (1^{ère} au sud) pour plonger à 90 m sous la station Etan02j (3^{ème} à partir du sud) et à 140 m sous la station Etan06 (6^{ème} à partir du sud). Il ne semble plus y avoir d'eau salée au nord de la route 199. L'ordre des résistivités de l'aquifère d'eau douce au-dessus de cette zone est le même que pour le modèle des résistivités interprété à partir de la tomographie de résistivité électrique (voir figure 15).

On remarque que le biseau d'eau salée imagée par tomographie de résistivité électrique à la figure 15, localisé à 30-40 m sous le début du profil au sud est reproduit par l'imagerie TEM. Alors qu'on perdait ce biseau au-delà de 300 m du début du profil TRE, on le suit très bien sous le profil TEM. La remontée d'une zone conductrice imagée par la TRE (figure 15) à l'extrémité du profil au nord semble être réelle car aussi détectée par la TEM (sud de la station Etan08, 3^{ème} station à partir du nord).

Les stations Etan02 et Etan04 de la mission de mai ont été réoccupées en juin (sites Etan01j et Etan02j) pour vérifier la reproductivité des

résultats. La comparaison montre que les mesures sont reproduites à l'intérieur de l'erreur ($\pm 2\%$).

1.2 Profil TEM de Fatima :

Sur la figure 24 du profil de Fatima, on remarque que la zone de faible résistivité ($< 5 \Omega.m$) débutant au nord de la station Fat01 (1^{ère} à partir du nord) s'enfonce vers le sud, passant de ~ 60 m de profondeur au nord jusqu'à 145 m au droit de la station Fat02j (3^{ème} à partir du nord). Elle semble s'arrêter entre les stations Fat02j et Fat02 (3^{ème} et 4^{ème} à partir du nord). Cette fin abrupte pourrait être causée soit par une barrière hydraulique (zone de faible perméabilité hydraulique) située entre ces deux stations, soit par l'incapacité de nos mesures de résoudre à plus grande profondeur cette zone conductrice. Le reste du profil vers le sud est résistant à l'exception du dernier sondage au sud, Fat03, qui semble montrer une baisse des résistivités vers 100 m de profondeur. Comme ce résultat est obtenu uniquement sur cette dernière station du profil, il serait important de vérifier ce résultat en effectuant d'autres sondages au sud de cette station.

Il est normal qu'aucune zone salée de faible résistivité n'apparaisse sur le profil TRE de Fatima car il est limité à une profondeur d'investigation de 60 m (figure 11). Or le profil TEM démontre que ces zones n'apparaissent qu'à partir de 60 m minimum et augmente par la suite plus au sud. Sous la station Fatj03 (5^{ème} à partir du nord), on semble observer une zone plus conductrice. Cette remontée semble corrélée avec la remontée de faible résistivité notée au droit de la région indiquée comme « marécage » au centre, à la figure 11. Il serait intéressant de réaliser quelques sondages supplémentaires dans cette zone pour connaître son origine.

À la figure 25, on a ajouté la station Fatj-04 située au sud-est du profil. Cette station a été prise pour vérifier si le manque de zone conductrice en profondeur sous le profil de Fatima était généralisé sur la partie nord de l'île Centrale. À l'examen de la figure 25, on s'aperçoit qu'il existe une zone de faible résistivité ($<5 \Omega.m$) à ~ 115 m de profondeur sous cette station et donc qu'il peut exister des zones d'eau salée entre le nord-est de l'île et la station.

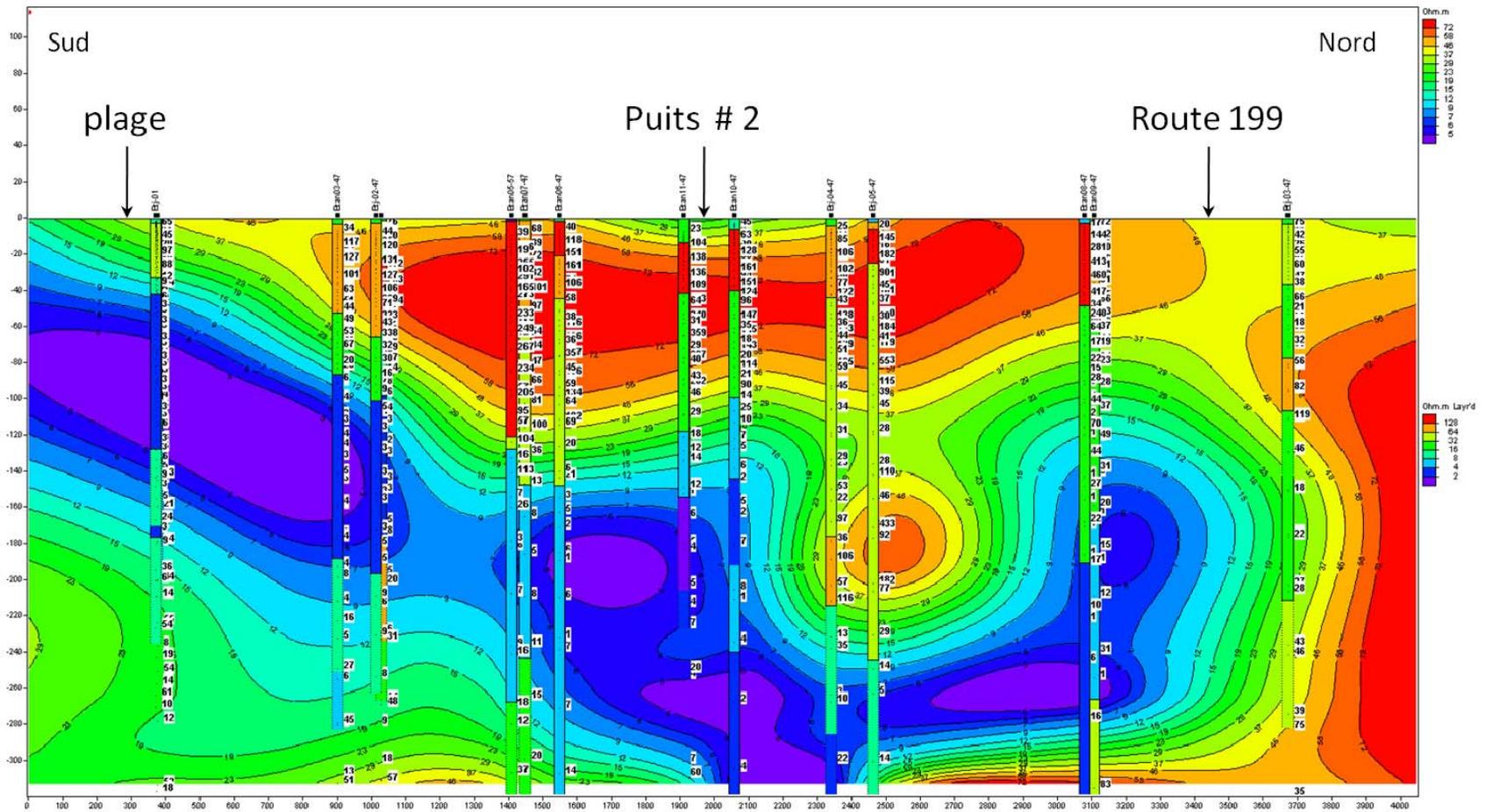


Figure 23 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil d'Étang-du-Nord

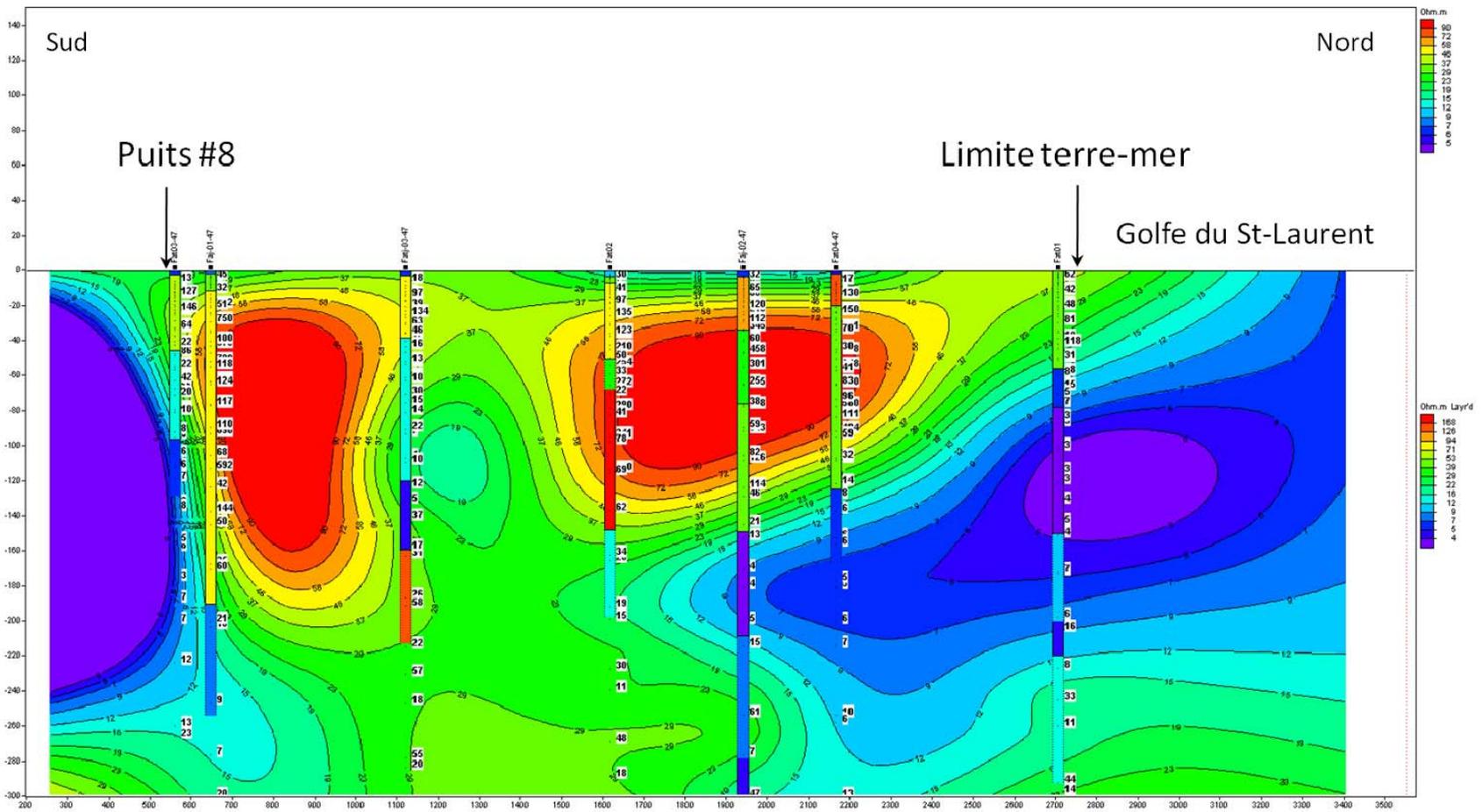


Figure 24 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil de Fatima

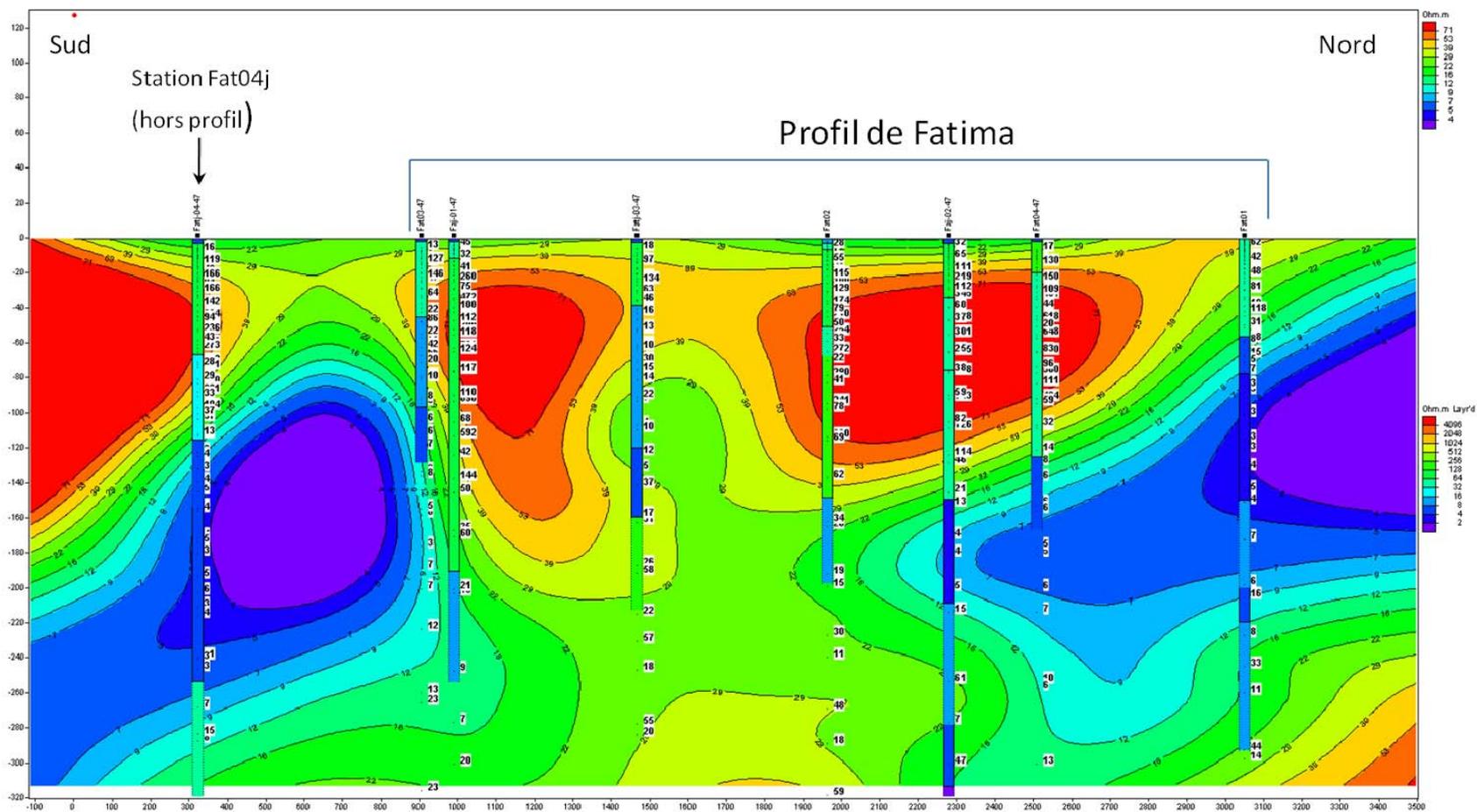


Figure 25 : profil des résistivités obtenues par les sondages TEM sur le profil de Fatima, incluant la station Fat04j située au sud-est du profil.

8. Discussion et Conclusion

Le travail présenté dans ce rapport avait pour objectifs (1) d'étudier la capacité des méthodes électriques à révéler les changements possibles dans le système aquifère de l'île de Cap-aux-Meules à l'aide des mesures répétitives, et (2) d'évaluer la capacité de la méthode TEM à imager le biseau d'eau salée.

- a) Méthodes de tomographie de résistivité électrique (TRE) : Ces changements, dans le système aquifère, sont liés essentiellement à la quantité de l'eau pompée dans les puits et à la recharge de la nappe suite aux précipitations et à la fonte des neiges. Quatre (4) campagnes de mesure ont été réalisées. En général, les mesures sur le terrain se sont bien déroulées. Les seules difficultés à signaler sont notamment les intersections des levés avec les routes où il faut bien protéger le câble par des gaines, et la proximité d'activité humaine près des câbles qui demande à redoubler de vigilance pour éviter leur endommagement. Il a fallu également surveiller les câbles dans les endroits habités pour éviter les accidents (contact avec courant dans les électrodes). La difficulté d'accès à quelques endroits par véhicule nous oblige aussi à transporter manuellement des lourdes bobines de câbles (25 Kg) sur de longues distances.

Les 4 campagnes ont été effectuées avec un système de mesure très rapide (Syscal Pro 96 d'Iris Instrument, France). Cela a permis d'enregistrer un très grand nombre de lectures (forte densité) par rapport au cas des mesures réalisées par le groupe Madelin'Eau en 2003 sur les mêmes profils (supérieur à 20 fois plus de données). Cette forte densité des mesures a permis de révéler des anomalies de faible taille indétectable dans le cas contraire où le modèle apparaît plus lisse. La comparaison des modèles de l'aquifère pour les 4 campagnes indique que les principales structures ressortent constamment. Il s'agit du mort-terrain résistif ($600 \Omega.m$) d'une épaisseur d'environ 5m suivi de

la nappe avec une résistivité moyenne de l'ordre de $60 \Omega.m$ et qui s'étend sur toute la profondeur étudiée. On note aussi la détection d'un ensemble de zones contaminées, proche de la surface, le long des deux levés. Également, les zones qui présentent une faible qualité des données sont répétitives. Ces éléments appuient d'une certaine manière la robustesse du modèle géoélectrique déduit pour l'aquifère. Les légères variations (entre modèles) constatées par endroits sont difficiles à expliquer. Elles peuvent être liées soit à de faibles changements dans le système aquifère soit à des légères différences dans le positionnement des électrodes d'une fois à l'autre. L'hypothèse des artefacts numériques liés aux processus d'inversion peut également expliquer ces changements mineurs. Cependant, ces erreurs de positionnement seront évitées dans le cas de l'installation d'un système permanent (électrodes et câbles enterrées et sollicités régulièrement).

Dans les portions des levés en bordure du golfe du Saint-Laurent, une couche conductrice (5 à $20 \Omega.m$) apparaît à plus de 55 m de profondeur dans le secteur de Fatima et à 30 m dans le secteur de l'Étang-du-Nord. Cette couche pourrait indiquer la zone de transition eau douce-eau salée. La profondeur de cette interface a été déterminée avec plus de précision lors des campagnes à l'aide de la méthode électromagnétique transitoire (TDEM).

b) Méthode TEM :

Les profondeurs obtenues pour le biseau d'eau salée ont une erreur associée à la qualité des données sur le terrain, à la non unidimensionnalité stricte des structures (interprétation sous formes de couches) et aux problèmes d'équivalence qui peuvent être présent. Cependant le cas du biseau d'eau salée, une couche très conductrice située sous d'autres couches plus résistantes, est un cas très favorable pour l'utilisation de la TEM et la minimisation de l'erreur dans l'estimation de la profondeur. On peut estimer que l'erreur sur la profondeur ne devrait pas dépasser 5%.

On note une différence de caractère du biseau d'eau salée entre le profil d'Étang-du-Nord (sud de l'Île Centrale) et le profil de Fatima (nord de l'Île Centrale). Il semble que ce dernier soit plus profond dans la région de Fatima et soit bloqué à quelques 700 m au sud de la côte par opposition au biseau sous le profil d'Étang-du-Nord qui est moins profond et plus continu en allant vers le nord. Cela pourrait être causé par la présence de zones (barrières) imperméables. Il existe deux forages dont la description géologique est disponible pour les deux profils (voir annexe 7). Le forage 13007086, foré près de l'entrée ouest de cap-Aux-Meules, indique 161.5 m de grès rouge fissuré alors que le forage 13007031, foré près du centre de Fatima, montre des alternances de grès rouge, de siltstone rouge et d'argilite sur 75 m. Ces lits d'argilite et de siltstone peuvent constituer des couches de très faible conductivité hydraulique.

c) Travaux recommandés :

Des essais d'inversion, en utilisant d'autres logiciels que Res2Dinv (Geotomo) devraient être effectués pour vérifier la robustesse des structures imagées. La distribution des résistivités ne devrait pas être dépendante du code d'inversion utilisé. Nous recommandons aussi de conduire des tests d'inversion simultanés pour le suivi temporel «time-lapse» afin d'évaluer quantitativement les changements de résistivité entre les 4 campagnes de TRE. Cette étude permettrait de mieux suivre l'évolution des résistivités du sous-sol associées aux variations de qualité de l'eau.

Les sondages TEM ont été effectués dans un corridor suivant les profils TRE afin de comparer les résultats avec ceux de résistivité électrique et d'obtenir l'information sur les nappes salées dans le voisinage des puits situés sur ces profils. Toutefois, leur altitude n'est pas connue avec précision (± 12 m). On recommande d'effectuer un levé d'arpentage (GPS à haute résolution) pour

déterminer leurs coordonnées et ainsi ramener les interprétations TEM au même référentiel que celles de TRE. Une intégration pourrait alors être réalisée des deux ensembles de données géophysiques.

Également, l'étude des propriétés électriques sur des échantillons de sol (issus de l'aquifère) devrait être réalisée en laboratoire pour mieux interpréter les variations de résistivité observées en profondeur. Cette étude prévue pour la phase II du projet devrait permettre de déterminer la résistivité en fonction de la formation géologique, de la teneur en eau (porosité, degré de saturation) et de la salinité de l'eau interstitielle. Des diagraphies de conductivité électromagnétique devraient être réalisées dans les puits et forages accessibles sans tubage métallique afin de permettre une cartographie des résistivités avec la profondeur et calibrer l'interprétation des mesures TRE et TEM. Finalement, il serait important de pouvoir obtenir les niveaux statiques et la qualité de l'eau aux puits situés près des profils de mesure, pour les périodes couvertes par les six campagnes. On pourrait établir les corrélations avec les modèles géoélectriques interprétés.

9. Références

Archie, G.E., 1942. *The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics*. Trans. A.I.M.E., 146: 389-409.

Campos, D., 2004. *Une étude de caractérisation de la structure interne d'une halde à stériles par méthodes géophysiques*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Comte, J-C., 2004. *Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers - Application à trois contextes climatiques contrastés*

(Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal). Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France.

Fitterman, D.V., Stewart, M.T., 1986. *Transient electromagnetic sounding for groundwater*. Geophysics, v. 51, pp. 995-1005.

Groupe Madelin'Eau, Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable, Rapport final, Document No 2, Décembre 2004.

Huntley, D., 1986. *Relation between permeability and electrical resistivity in granular aquifers*. Ground Water, 1986, Vol.24, No.4, 466-474.

IRIS Instruments, 2005. Syscal Pro Standard et Switch Pro (48-72 or 96) Version, 10 Channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements. Manuel en ligne. <http://www.Heritagegeophysics.com/images/promanual.pdf>.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press.

Loke, M.H., 2002. *RES2DINV ver. 3.5, Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method*. User manual.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44, 2, 131-152.

McNeill, J.D., 1990. *Use of electromagnetic methods for groundwater studies*. In : Ward, S.H. (ed), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 1: Review and Tutorial. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 191-218.

Nabighian N. and Elliot C.L., 1976, *Negative induced polarization effects from layered media*, Geophysics, 1236-1 255.

Parkhomenko, E., 1967. *Electrical properties of rock*. G.V. Keller, ed., Plenum Press, New York, 1967.

Razafindratsima, S., Cosenza, P., Hovhannissian, G., Camerlynck, C., Tabbagh, A., 2003. *Influence de la teneur en eau sur les propriétés électriques complexes des matériaux argileux : un état des connaissances*. In : Géophysique des sols et des formations superficielles : Geofcan : actes du 4ème colloque. Paris (FRA) ; Paris : Université Pierre et Marie Curie ; IRD, p. 153-156. Colloque Geofcan, 4., Paris (FRA).

Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction to applied and environmental geophysics*. Edited by John Wiley and Sons Ltd, England.

Urish, D., 1981. *Electrical resistivity–hydraulic conductivity relationship in glacial outwash aquifers*. Water Resources Research, 1981, Vol.5 No 17, pp. 1401-1408.

Annexe I : Étude de sensibilité des méthodes électrique pour la détection
d'infiltrations salines

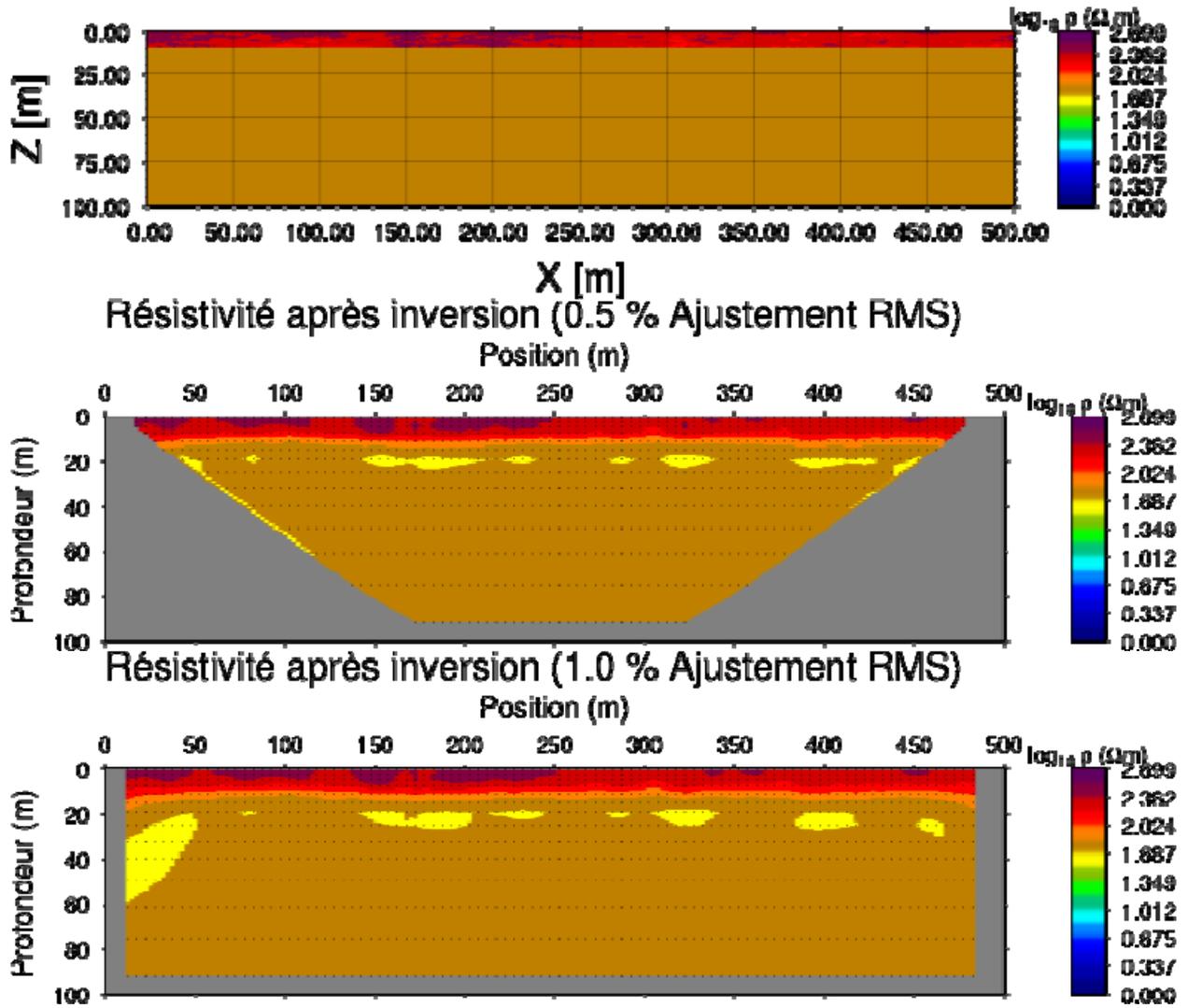


Figure A1.1 - Modèle de résistivité sans infiltration.

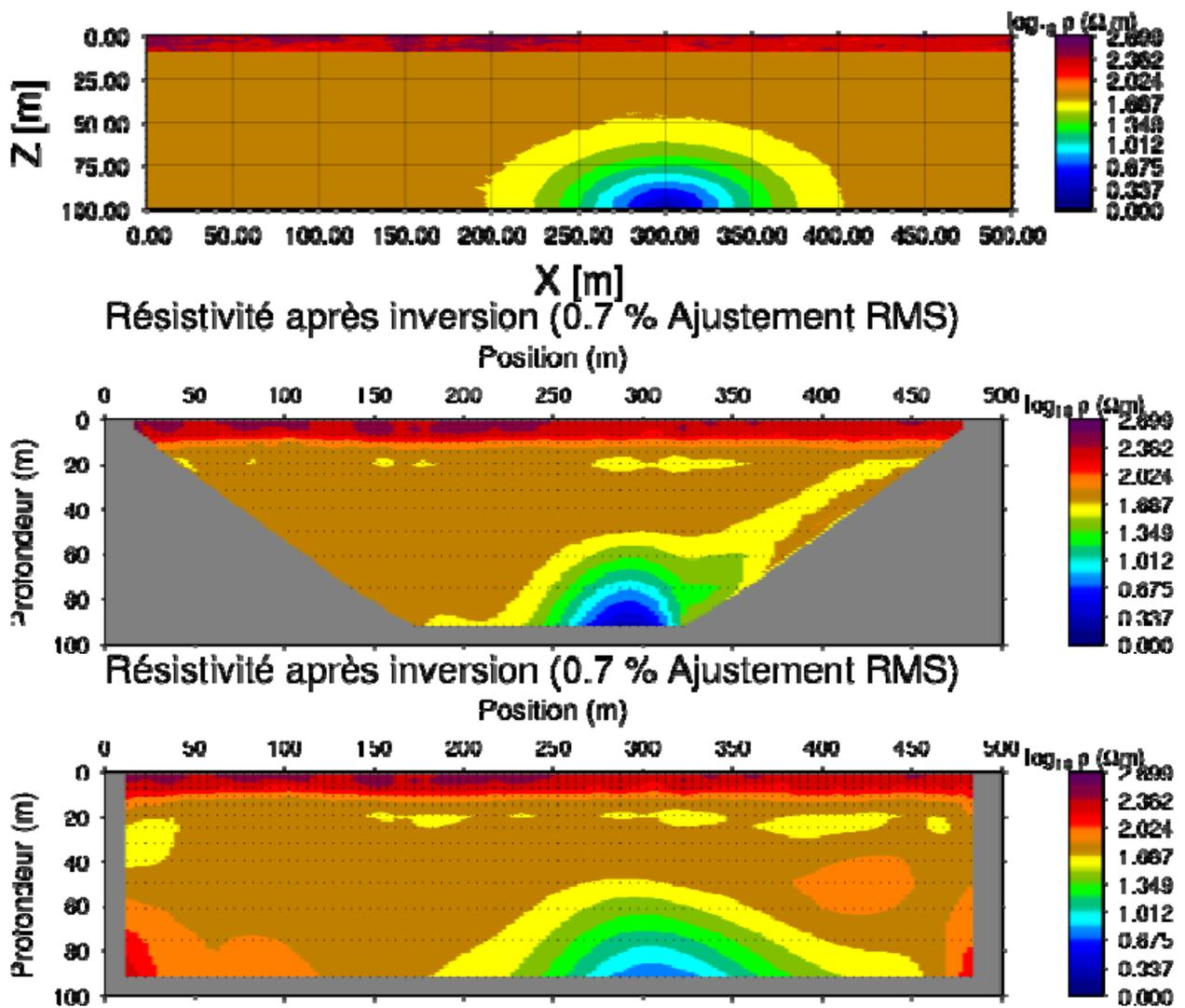


Figure A1.2 - Modèle de résistivité avec concentration maximale de l'infiltration à 100 m de profondeur.

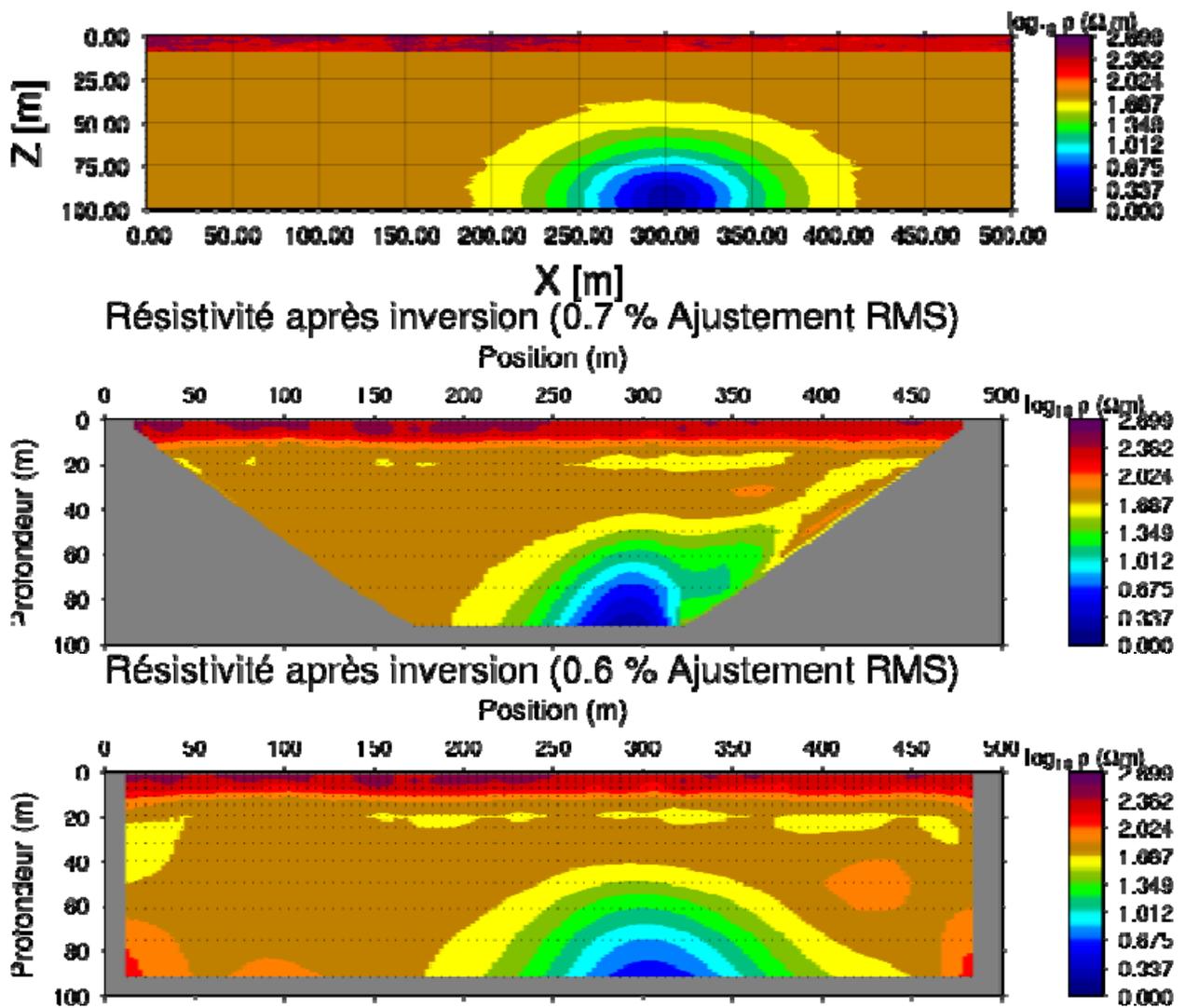


Figure A1.3 – Modèle de résistivité avec concentration maximale de l'infiltration à 90 m de profondeur.

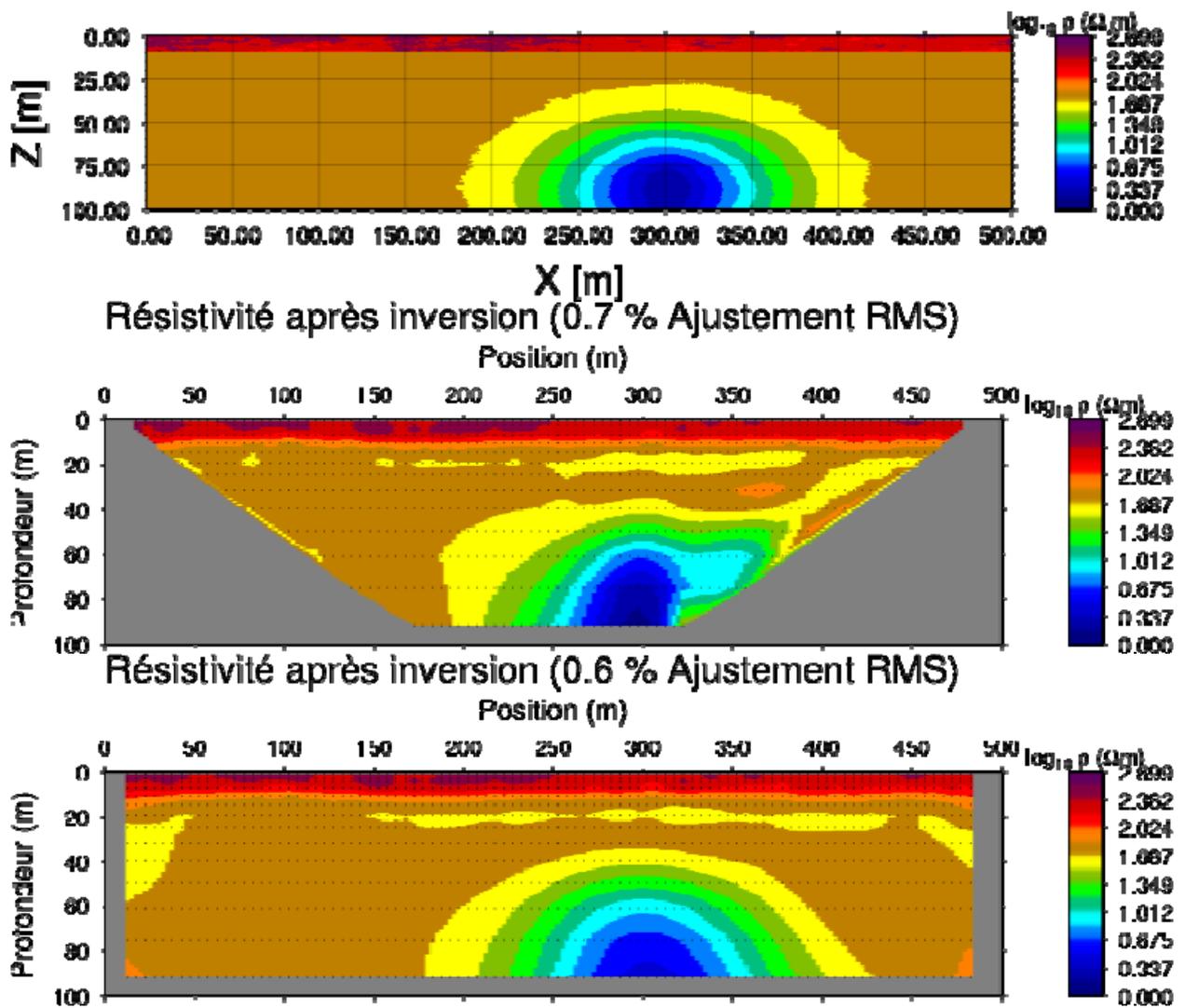


Figure A1.4 - Modèle de résistivité avec concentration maximale de l'infiltration à 80 m de profondeur

1.1 Biseau d'eau salée

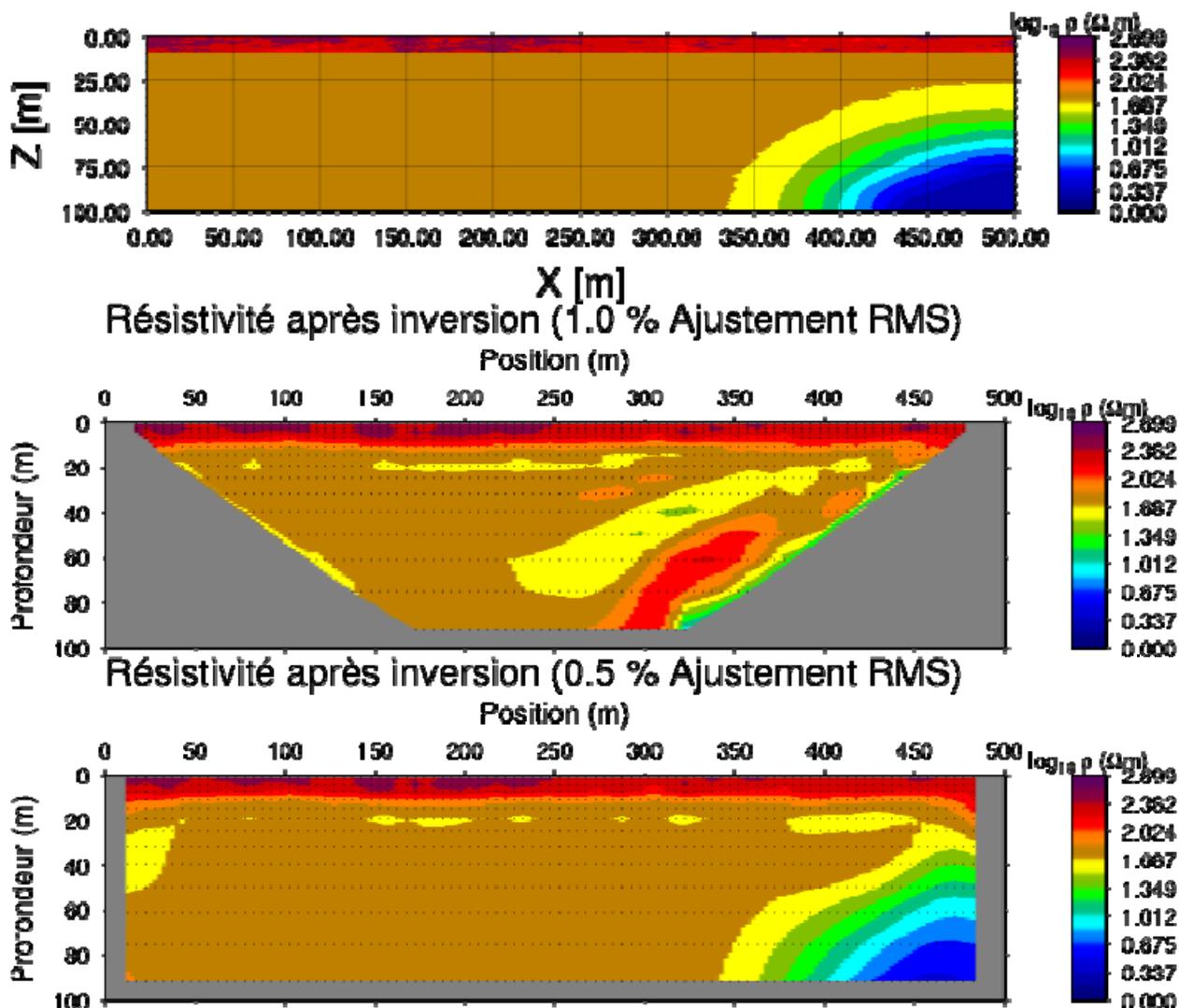


Figure A1.5 – Modèle de résistivité avec concentration maximale du biseau ayant son sommet à 80 m.

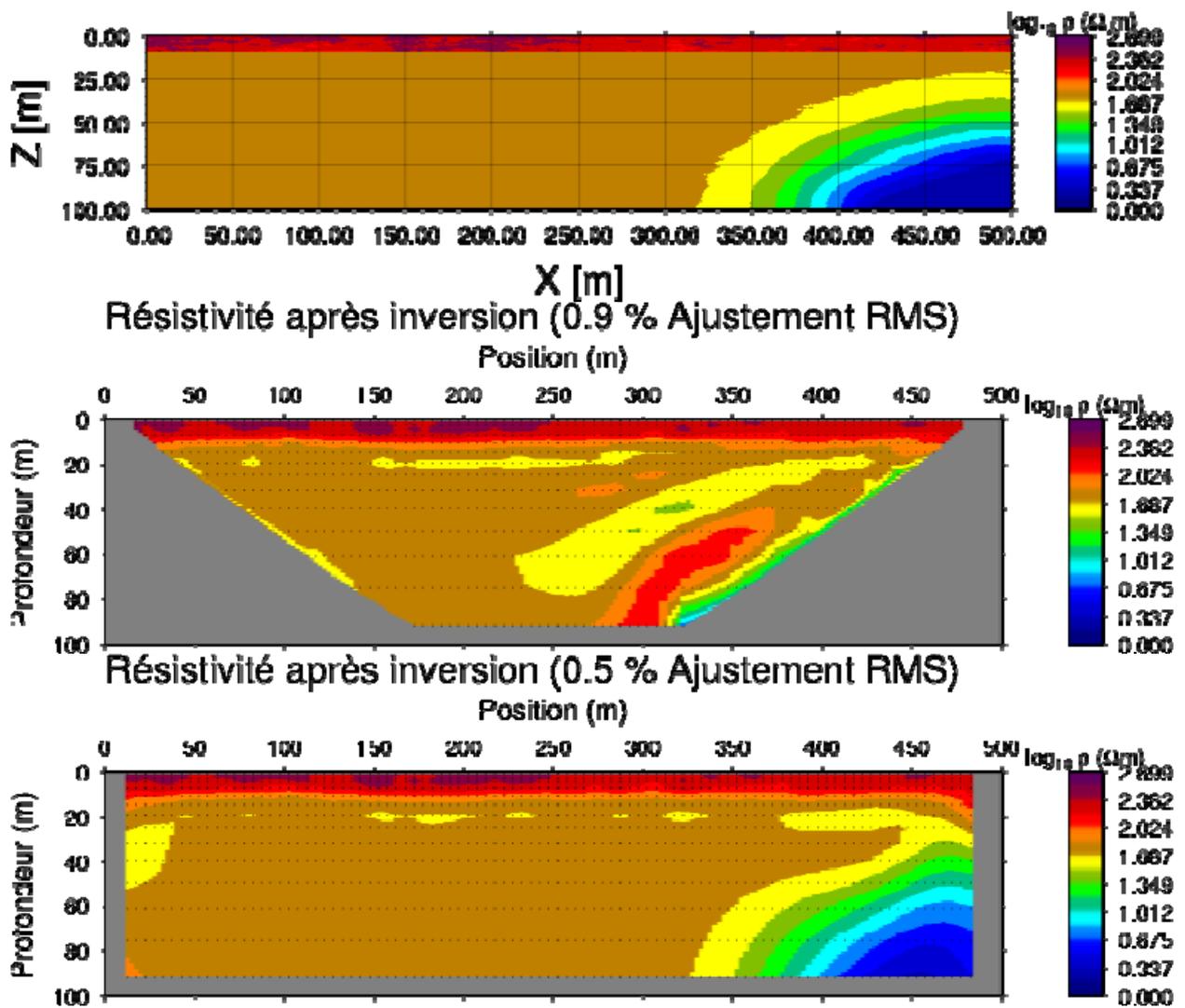


Figure A1.6 - Modèle de résistivité avec concentration maximale du biseau ayant son sommet à 75 m.

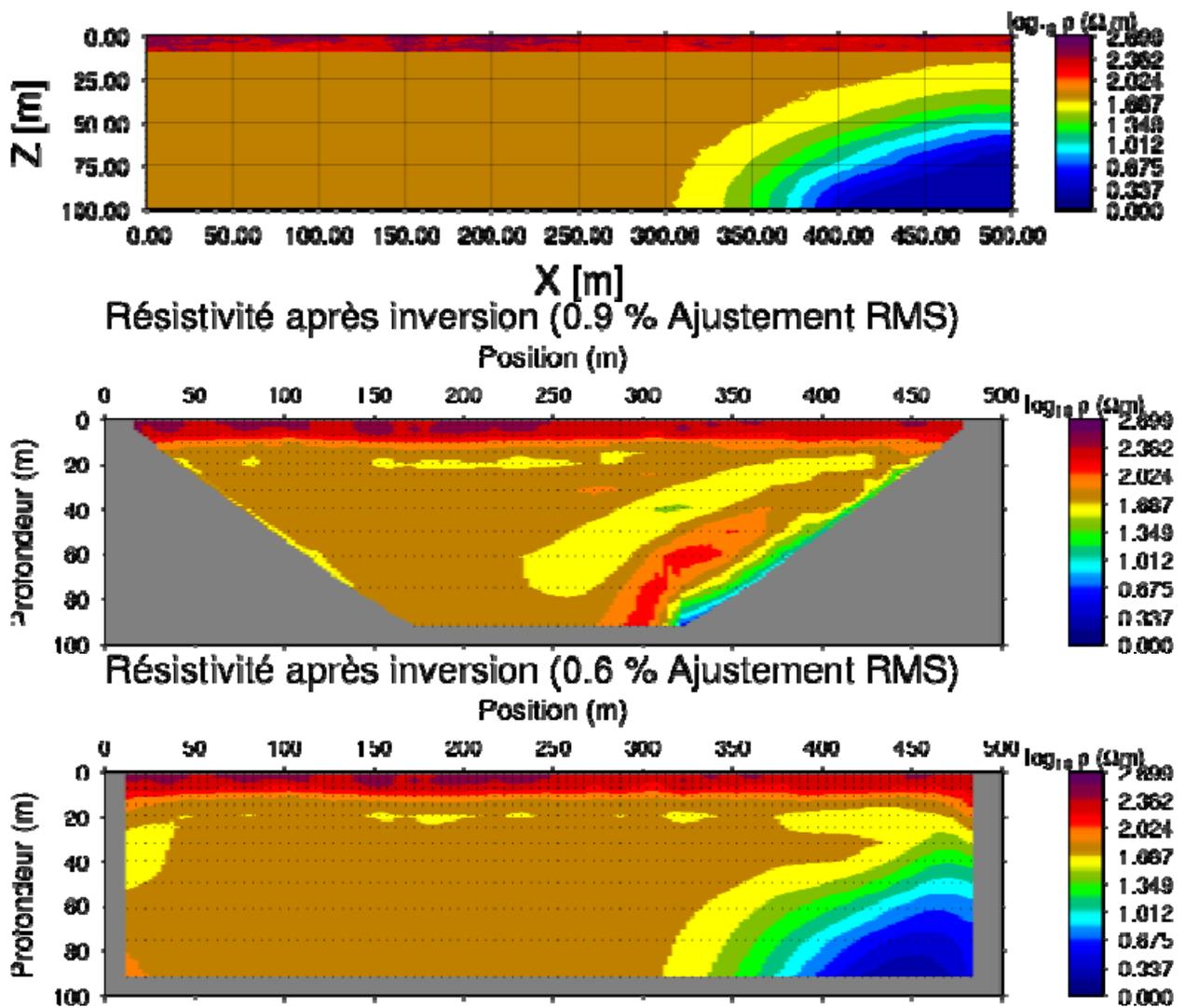


Figure A1.7 - Modèle de résistivité avec concentration maximale du biseau ayant son sommet à 70 m.

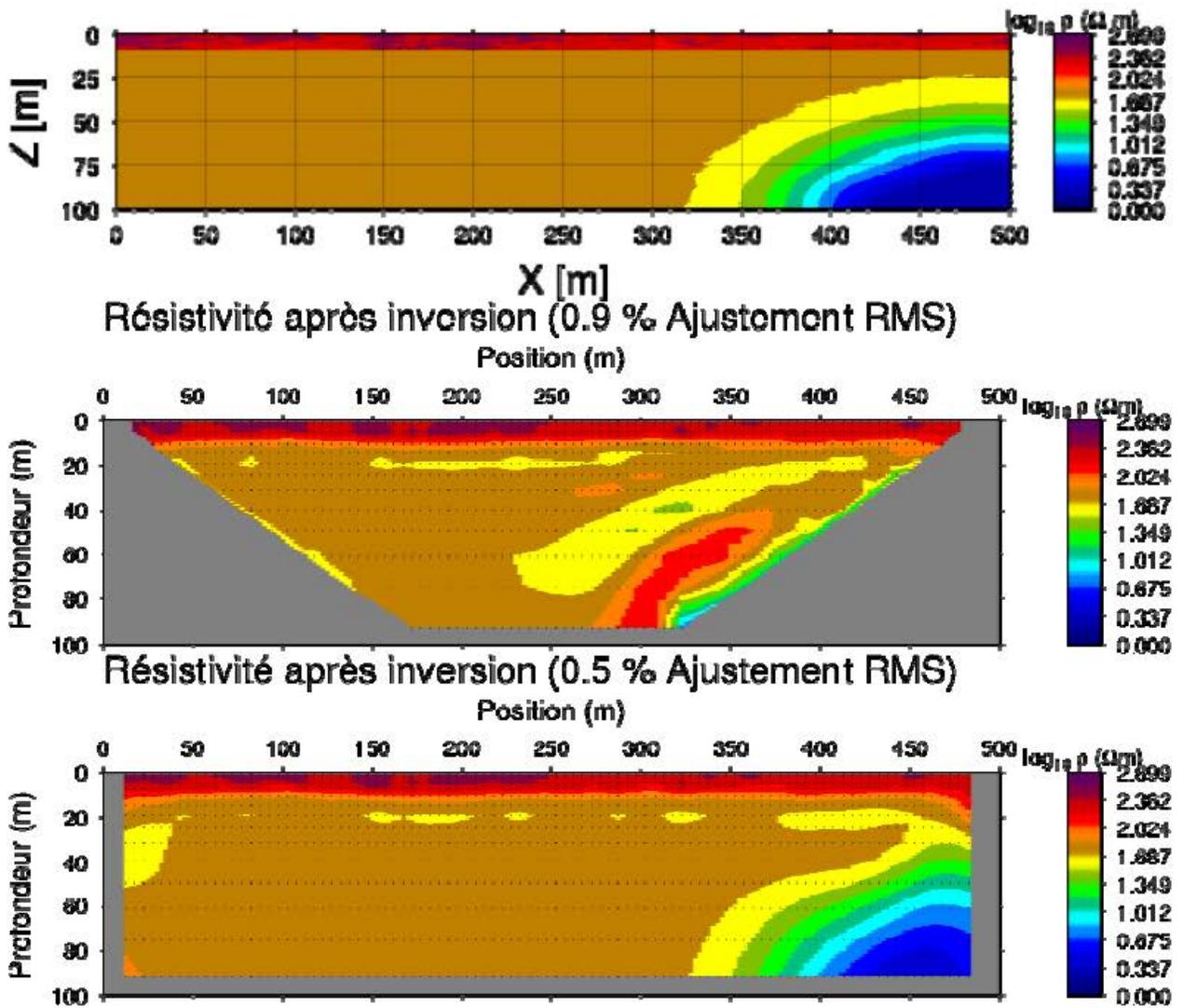


Figure A1.8 – Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 15 m selon X.

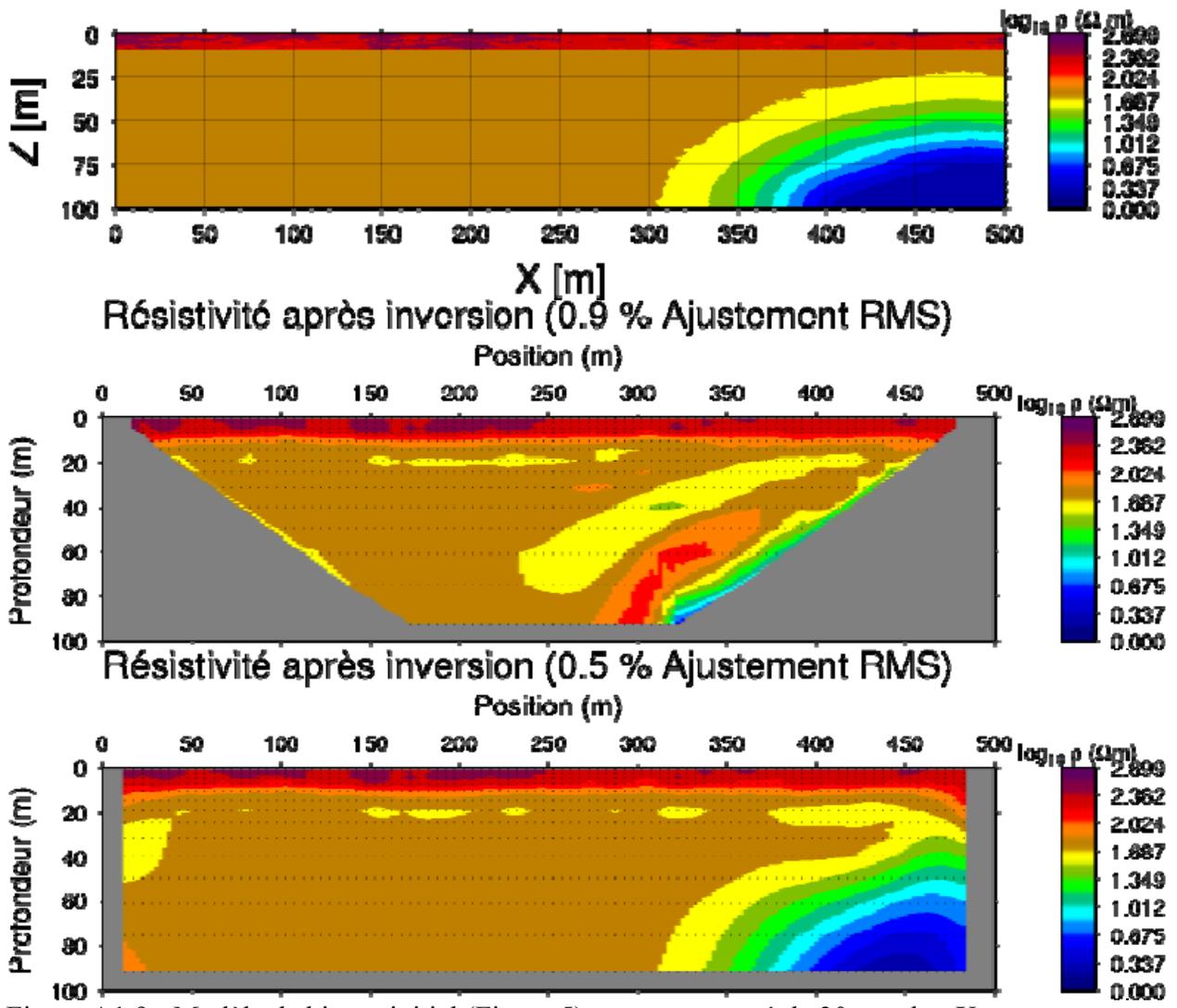


Figure A1.9 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 30 m selon X.

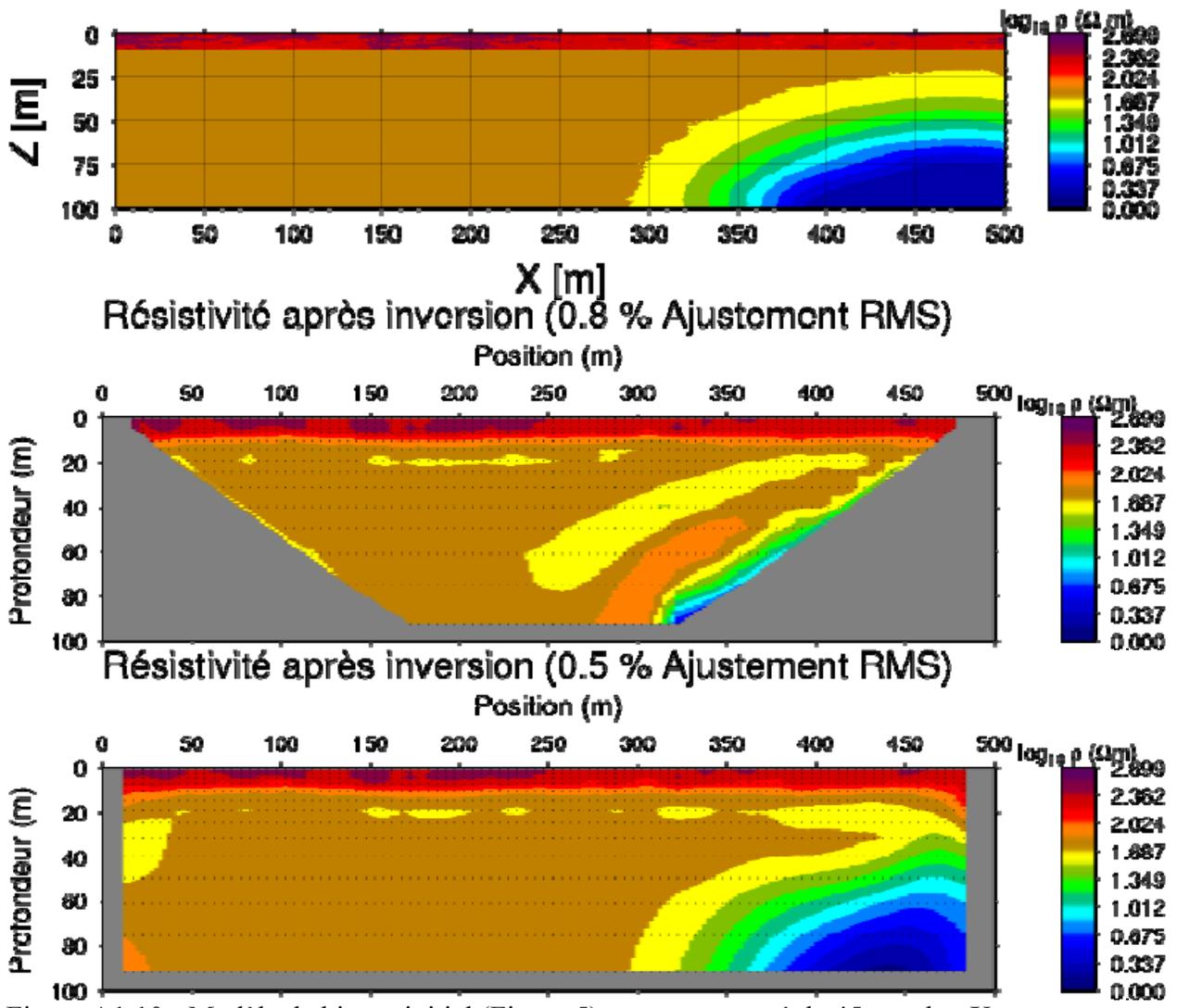


Figure A1.10 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 45 m selon X.

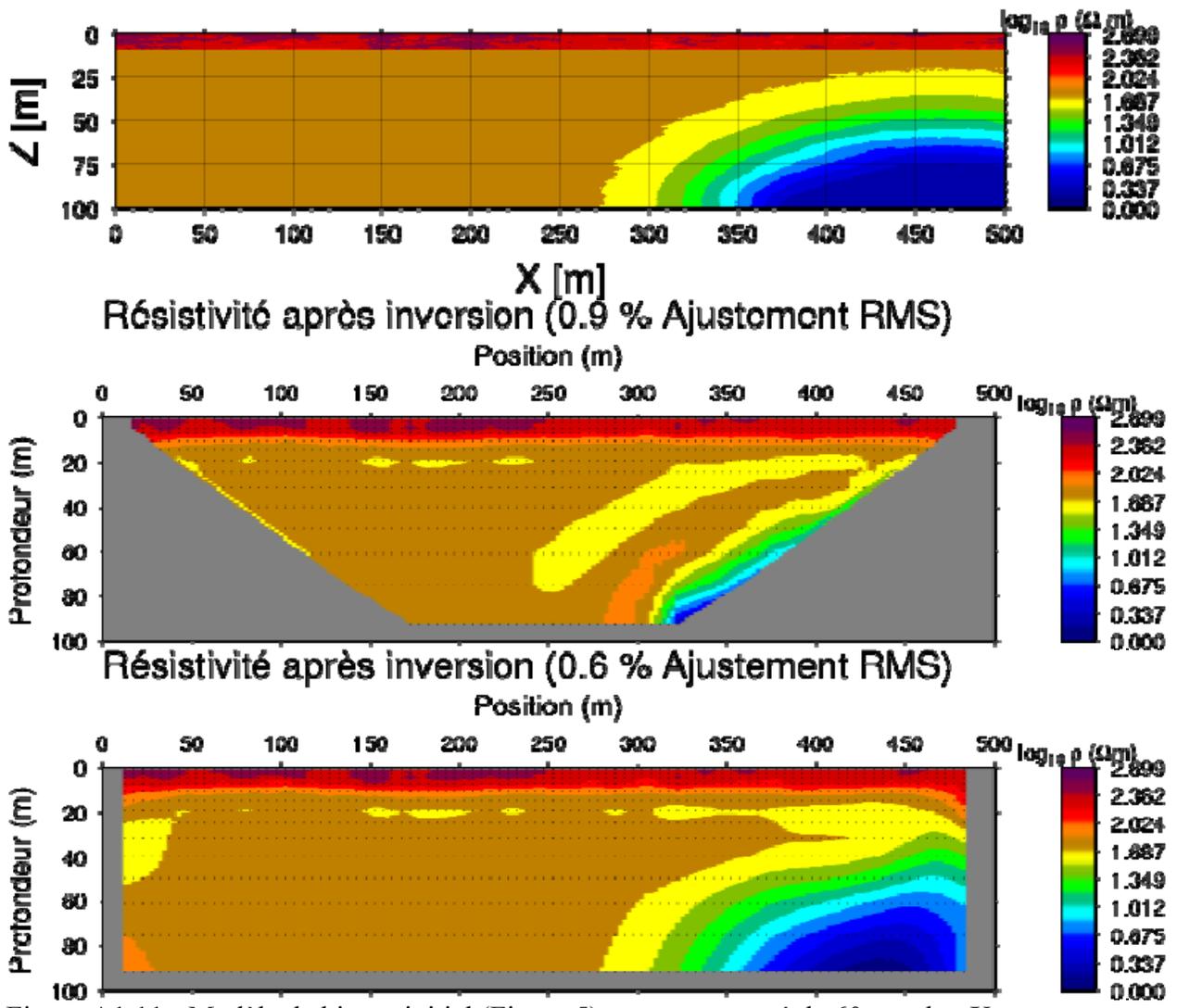


Figure A1.11 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 60 m selon X.

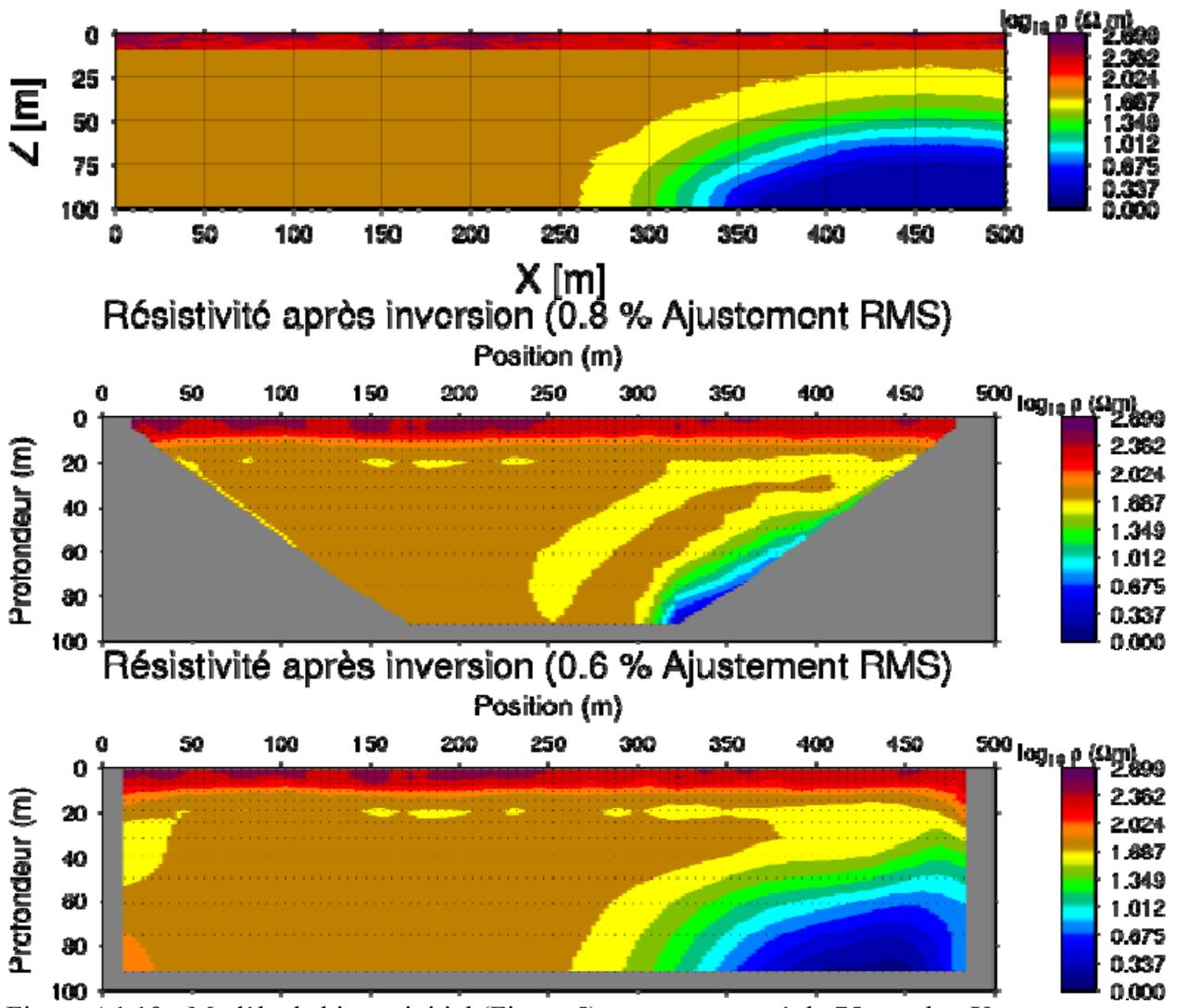


Figure A1.19 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 75 m selon X.

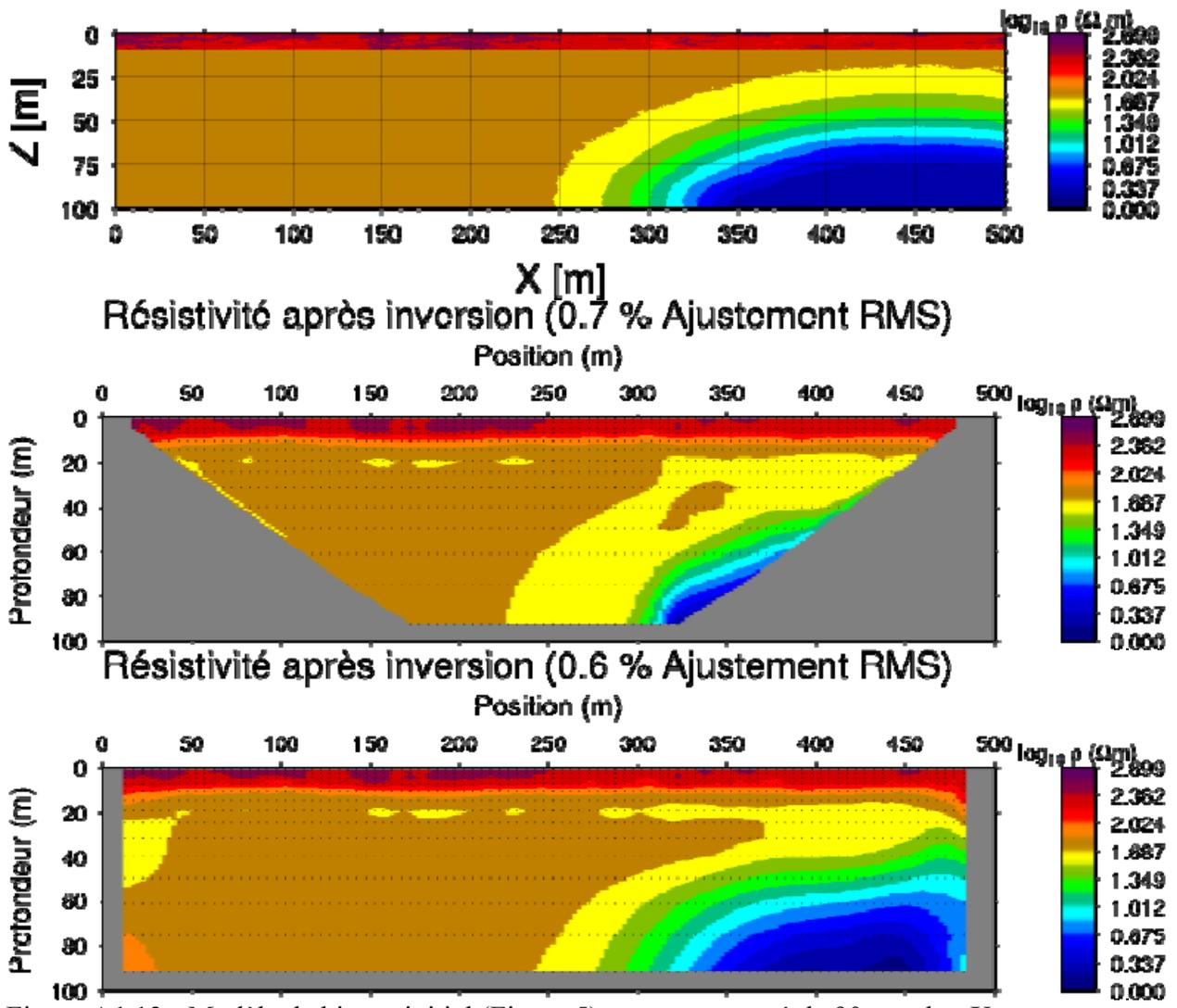


Figure A1.13 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 90 m selon X.

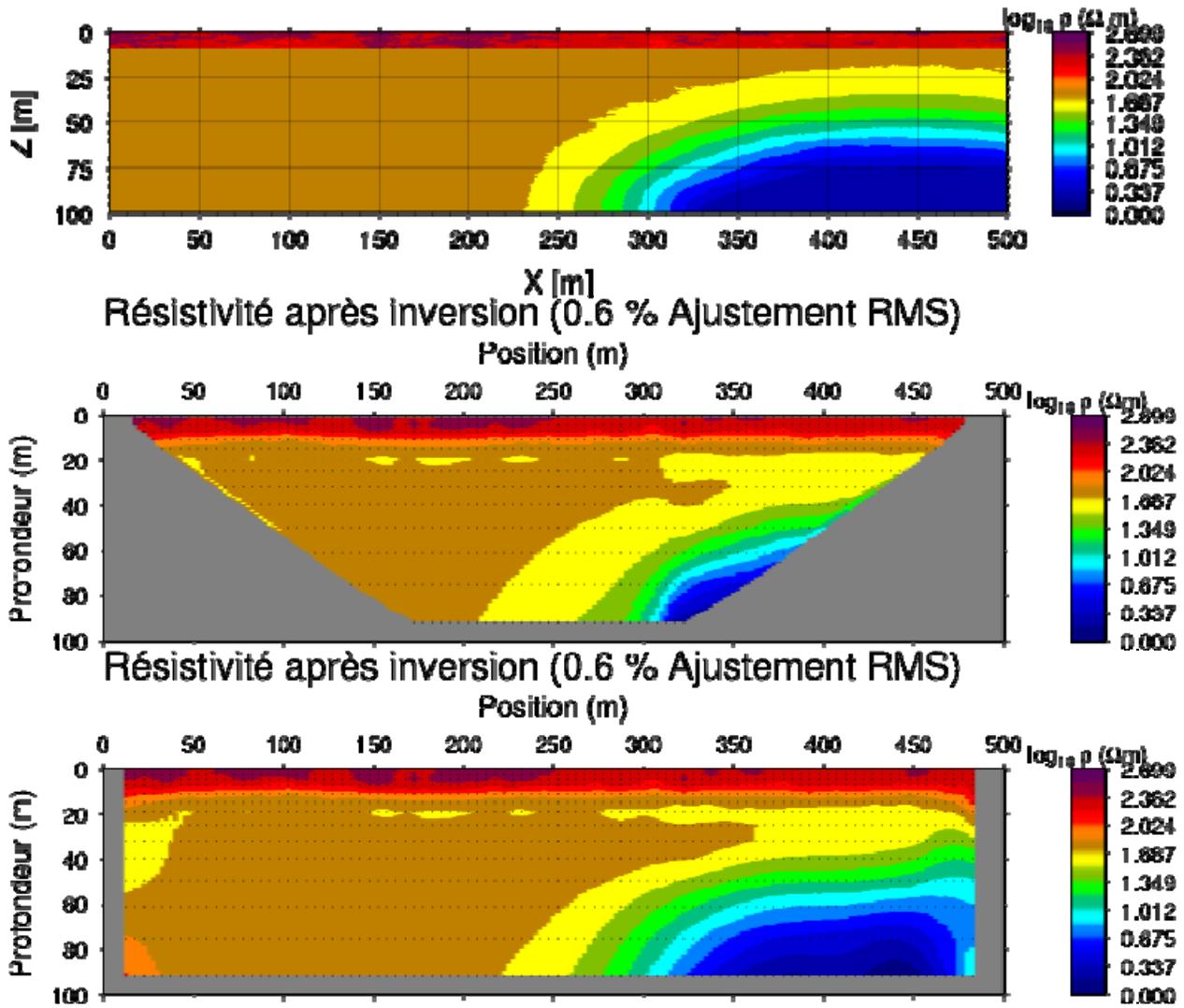


Figure A1.14 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 105 m selon X.

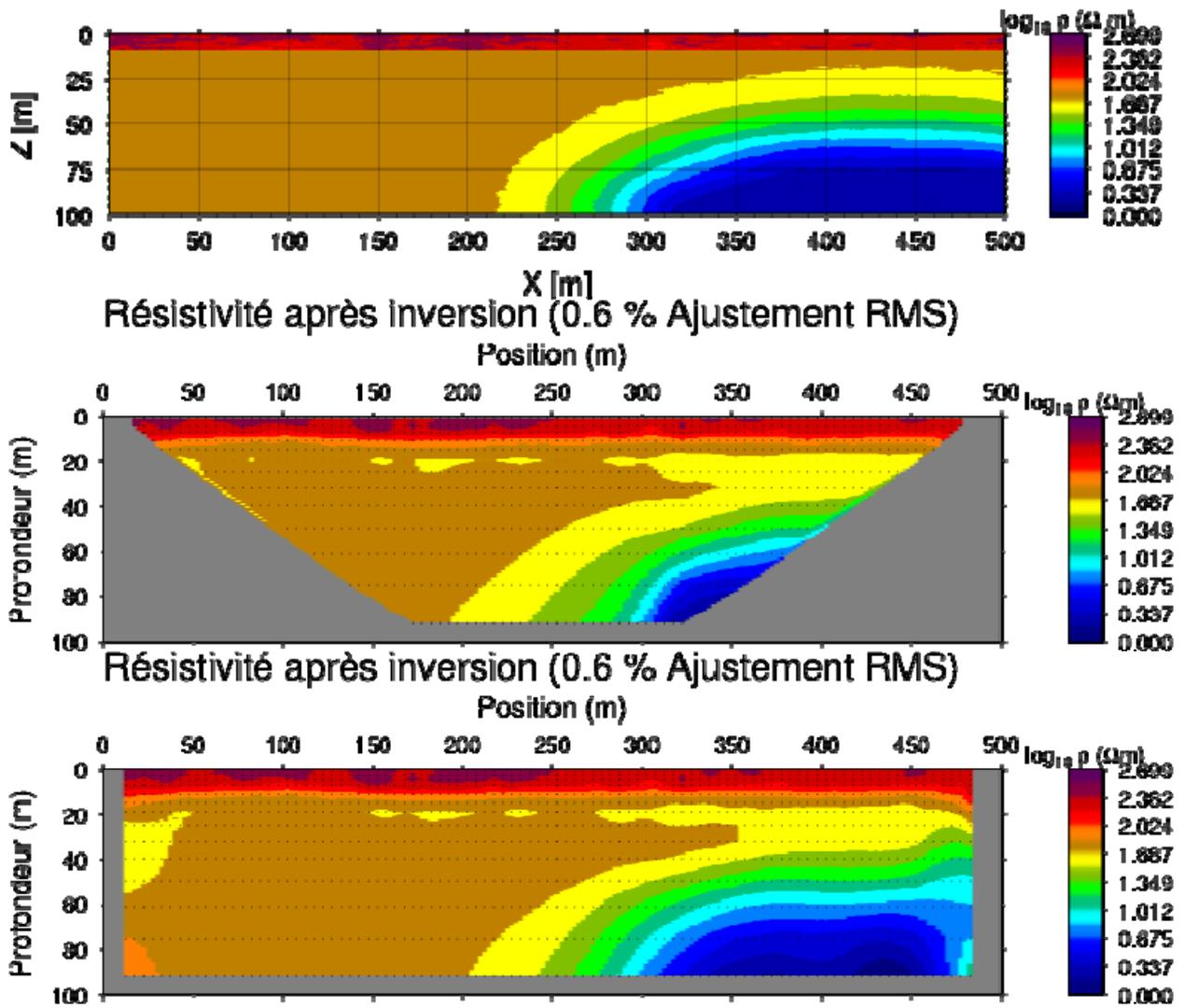


Figure A1.20 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 120 m selon X.

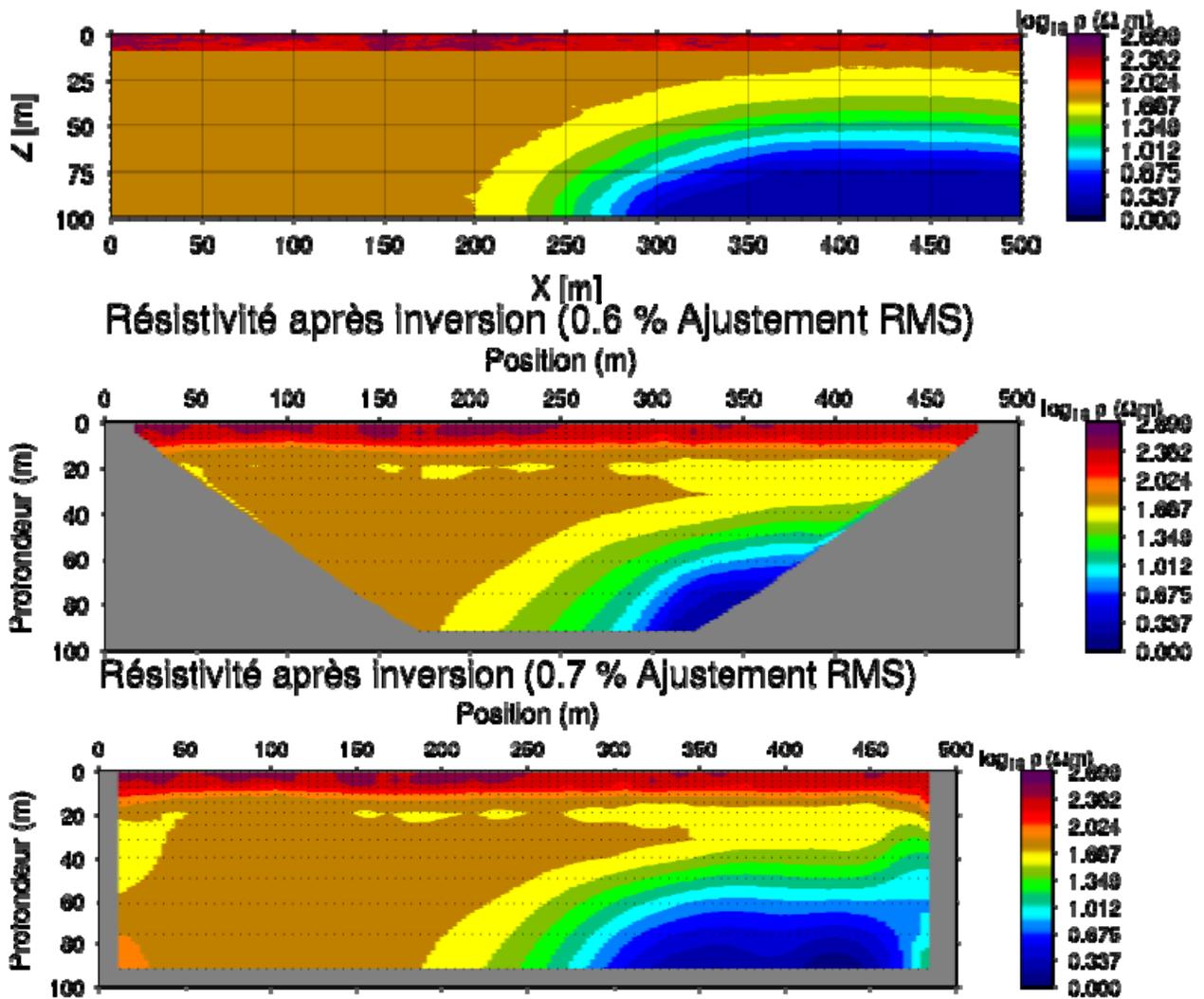


Figure A1.21 - Modèle de biseau initial (Figure 5) ayant progressé de 135 m selon X.

Annexe II : Coordonnées (MTM NAD83) des points GPS pris le long du levé de Fatima

Numéro des points GPS	numéro d'électro des	X MTM NAD83	Y MTM NAD83	altitude m/nmm	commentaires
1	1	5251033.7	274213.9	34.8	point de départ
2	10	5251075	274196.9	32.7	
3	13	5251088.1	274189.8	32.3	passage à travers une conduite
4	16	5251102.4	274191.4	32.7	
5	20	5251122.8	274192.2	32.3	
6	21	5251127.6	274192.7	31.6	
7	27	5251156.8	274198.2	30.3	
8	30	5251171.8	274199.3	29.5	
9	32	5251181.6	274200.8	28.8	
10	39	5251216.3	274204.0	28.6	
11	40	5251221.3	274204.2	27.6	coté sud de l'itinéraire menant au puits # 8
12	42	5251231	274201.9	27.6	
13	44	5251240.2	274198.7	27.7	
14	47	5251254.3	274193.7	27.0	
15	48	5251258.9	274192.1	27.0	
16	49	5251263.4	274190.6	26.3	
17	54	5251286.9	274182.4	24.8	passage à travers un marécage
18	56	5251296.9	274179.5	24.7	
19	57	5251301	274178.1	25.1	
20	58	5251306.1	274177.0	25.5	
21	59	5251310.5	274175.4	24.9	
22	60	5251315.5	274174.1	25.6	
23	61	5251320.3	274173.1	26.0	
24	73	5251378.1	274157.9	24.9	
25	74	5251383.1	274157.1	24.5	
26	76	5251392.5	274154.5	22.8	
27	78	5251402.2	274151.8	23.3	
28	79	5251407	274150.8	22.2	
29	80	5251411.7	274149.9	21.4	
30	82	5251421.5	274147.9	21.9	
31	86	5251440.4	274141.4	21.7	
32	90	5251458.6	274134.7	20.8	
33	92	5251468.2	274130.7	20.4	
34	93	5251472.7	274129.0	21.0	
35	96	5251486.4	274124.6	21.9	bord sud du chemin des Caps
36	99	5251498.3	274115.0	23.1	
37	107	5251531.4	274093.4	22.6	
38	128	5251626.2	274050.6	20.1	
39	131	5251641	274046.3	19.2	

40	133	5251650.2	274043.8	17.6	
41	136	5251664.6	274039.7	15.2	
42	144	5251702.7	274028.3	14.4	fin de la 1 ^{ère} translation
43	160	5251782.3	274019.0	14.4	bord sud du chemin Philippe-Thorne
44	173	5251845.4	274009.8	15.1	remblais avec une pente prononcée
45	175	5251854.4	274009.6	12.8	
46	176	5251859.8	274007.5	11.8	passage dans un marécage
47	180	5251878.9	274002.5	11.8	
48	181	5251883.5	274000.7	12.4	
49	184	5251897.6	273996.7	12.1	
50	185	5251902.3	273994.4	12.5	
51	187	5251911.3	273991.3	14.2	
52	191	5251930.6	273986.5	14.6	
53	192	5251935.6	273986.4	13.7	fin de la 2 ^{ème} translation
54	193	5251940.5	273985.8	12.9	
55	194	5251945.5	273986.2	13.6	
56	195	5251950.4	273986.0	14.4	
57	197	5251960.2	273987.5	14.5	
58	199	5251970.1	273989.3	15.6	
59	208	5252014.5	273994.2	15.9	
60	213	5252039.7	273997.5	15.5	
61	224	5252094	274002.9	14.8	
62	240	5252173.5	274008.6	13.7	fin de la 3 ^{ème} translation
63	247	5252206.3	274020.6	13.7	
64	269	5252310.1	274052.6	10.9	
65	270	5252316	274052.9	10.3	
66	271	5252320.7	274053.4	9.2	
67	272	5252325.3	274052.2	7.4	
68	273	5252329.9	274052.9	5.9	
69	274	5252335	274052.8	5.6	fond d'un chenal
70	275	5252340.1	274053.0	7.3	
71	276	5252344.8	274052.6	8.5	
72	278	5252354.3	274052.0	9.8	
73	281	5252369.3	274052.5	10.2	
74	282	5252374.1	274051.8	10.7	
75	284	5252383.9	274050.5	10.5	
76	285	5252388.7	274050.0	9.7	bord sud du chemin Edgar-Thorne
77	288	5252404.9	274046.5	10.2	fin de la 4 ^{ème} translation
78	302	5252471.1	274063.8	9.3	
79	306	5252487.6	274074.7	8.8	
80	308	5252496.3	274079.6	8.6	
81	315	5252529.5	274090.7	10.2	
82	318	5252543	274097.2	10.3	

83	319	5252547.5	274099.2	10.2	
84	322	5252561.5	274104.3	9.9	
85	326	5252580.5	274110.0	10.6	
86	329	5252595	274113.7	10.2	
87	334	5252619.3	274118.8	9.8	
88	335	5252624.7	274119.6	9.4	
89	336	5252629.4	274120.1	8.8	fin de la 5 ^{ème} translation
90	341	5252653.8	274120.9	8.9	
91	347	5252683.7	274122.1	9.2	
92	349	5252693.2	274121.3	8.4	
93	351	5252702.7	274118.6	8.8	
94	352	5252708	274118.5	8.6	intersection du levé avec l'itinéraire du passage de la conduite de refoulement
95	358	5252729.6	274098.4	8.7	
96	363	5252745.7	274079.2	9.8	passage près d'une installation métallique liée à la conduite de refoulement
97	366	5252758.1	274070.7	9.5	
98	378	5252803.5	274032.5	7.9	
99	381	5252814.6	274022.5	7.7	
100	384	5252828.6	274019.0	7.7	fin de la 6 ^{ème} translation
101	387	5252839.4	274017.8	7.5	
102	391	5252860.4	274004.6	7.3	
103	400	5252904.3	273995.8	7.0	
104	424	5253015.7	273953.4	4.7	golfe du Saint-Laurent, fin du profil

Annexe III : Coordonnées (MTM NAD83) des points GPS pris le long du levé « puits #8 »

nom des points GPS	numéro d'électrodes	X MTM NAD83	Y MTM NAD83	altitude m/nmm	commentaires
105	1	5251023.33	274398.662	43.061	point de départ, le plus élevé
106	7	5251052.11	274391.24	38.989	
107	11	5251070.6	274383.751	37.554	
108	12	5251074.99	274381.902	37.761	
109	16	5251093.86	274375.098	36.241	
110	28	5251145.08	274344.342	34.321	
111	31	5251158.35	274337.268	33.485	
112	34	5251171.38	274329.34	35.296	
113	35	5251175.6	274327.111	35.934	
114	36	5251180.4	274325.945	36.489	
115	42	5251208.15	274314.864	34.726	clôture sud du puits #8 en face du puits #8 clôture nord du puits #8
116	43	5251212.93	274312.871	34.2	
117	44	5251217.76	274312.63	33.244	
118	46	5251227.23	274311.27	32.125	
119	48	5251237.06	274308.983	33.568	
120	54	5251269.26	274303.525	32.146	
121	64	5251315.81	274298.5	29.812	
122	80	5251394.87	274287.729	26.946	
123	88	5251432.54	274275.237	26.097	
124	96	5251469.18	274259.757	25.022	

Annexe I V: coordonnées (MTM NAD83) des points GPS pris le long du levé de l'Étang-du-Nord

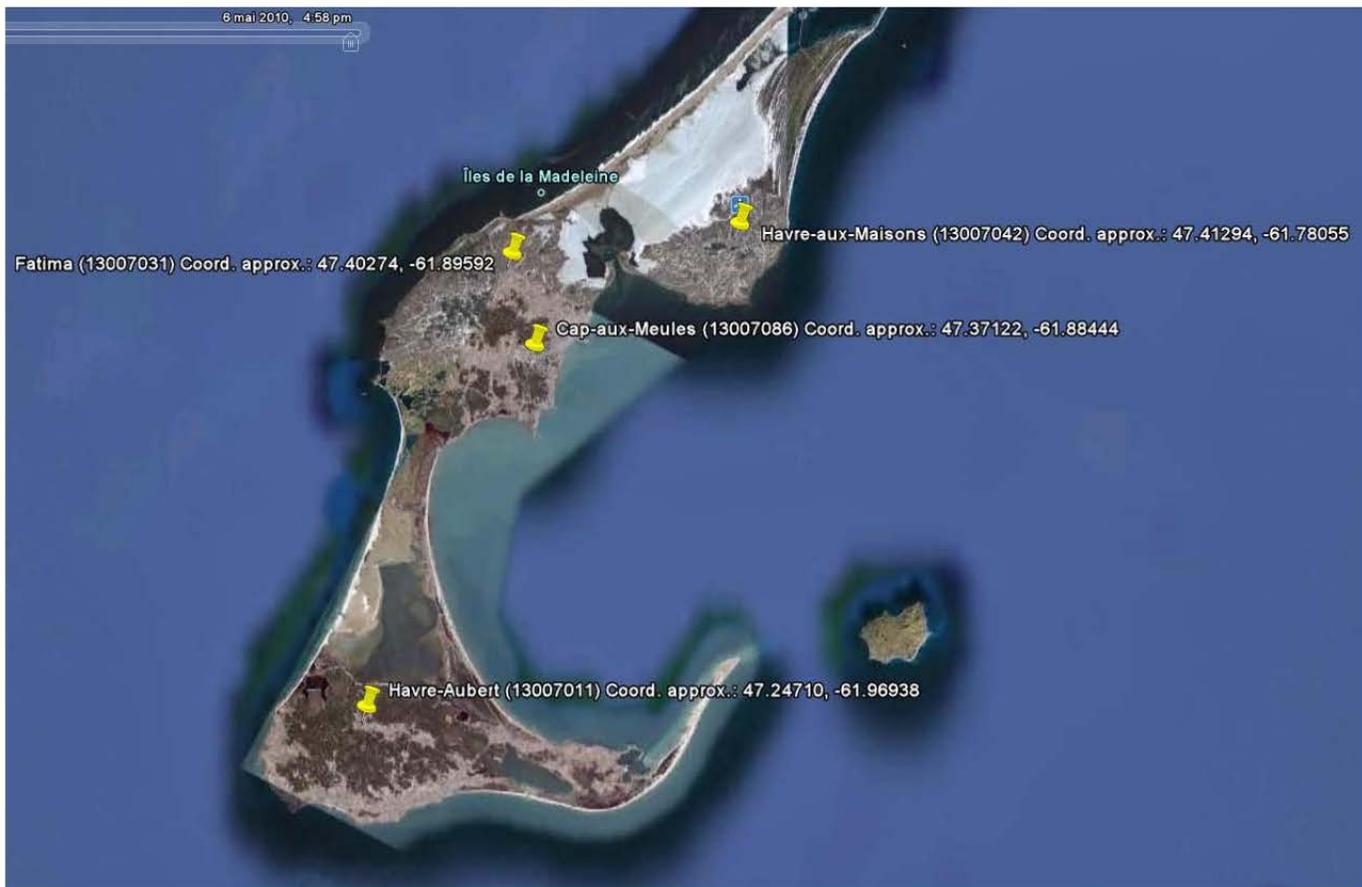
numéro des points GPS	numéro d'électrodes	X	Y	altitude m/nmm	commentaires
		MTM NAD83	MTM NAD83		
125	1	5245897.7	275238.9	0.0	point de départ dans les sables de la mer
126	3	5245904.5	275245.1	0.6	
127	4	5245908	275248.3	1.9	montée avec un petit escarpement
128	11	5245932.5	275272.7	2.3	
129	22	5245972.7	275309.3	1.2	passage à travers une zone marécageuse
130	25	5245986.2	275316.2	1.3	
131	32	5246019.4	275326.5	4.5	
132	36	5246038.1	275332.2	4.9	
133	47	5246088.1	275355.2	5.3	
134	54	5246119.2	275371.0	4.5	
135	62	5246154.8	275389.2	3.8	
136	63	5246159.3	275391.1	3.4	
137	65	5246167.8	275395.3	1.5	zone marécageuse
138	71	5246191.9	275412.4	2.4	
139	76	5246214.8	275422.7	3.7	
140	77	5246219.4	275423.9	4.6	
141	82	5246242.1	275434.4	6.4	
142	86	5246259.9	275443.0	7.5	
143	95	5246301	275460.6	9.2	
144	96	5246305.8	275462.8	9.2	fin de la première portion du profil
145	104	5246342.9	275477.4	9.6	champ de la Turbide
146	108	5246361.8	275483.3	11.5	
147	114	5246390.6	275491.6	12.7	
148	118	5246409.4	275497.7	13.3	
149	126	5246448	275507.8	14.4	
150	136	5246497.8	275516.0	14.6	bord sud du chemin Turbide
151	154	5246582.3	275521.9	16.7	
152	160	5246617.1	275523.2	16.1	
153	187	5246750.6	275505.8	18.8	
154	190	5246765.3	275503.8	17.6	passage d'une zone marécageuse
155	192	5246774.9	275502.4	17.9	fin de la 2e translation
156	193	5246779.9	275501.8	18.6	
157	199	5246809.3	275497.2	20.8	
158	216	5246893.1	275486.8	19.3	
159	224	5246933	275485.6	20.1	
160	227	5246947.8	275485.1	19.7	
161	228	5246952.6	275483.5	19.0	
162	233	5246974.8	275472.7	18.4	

163	240	5247008.8	275466.8	20.1	fin de la 3 ^{ème} translation
164	247	5247042.6	275458.1	21.2	
165	252	5247066.4	275451.8	24.4	
166	256	5247084.9	275445.8	25.3	
167	258	5247094.6	275442.7	23.6	
168	262	5247114.3	275438.8	21.9	
169	266	5247134	275437.2	22.1	
170	268	5247143.9	275437.9	23.3	
171	270	5247152.7	275434.2	25.4	
172	273	5247164.2	275425.3	29.7	
173	274	5247168.7	275423.8	30.7	Passage dans le gazon à côté du chalet de Monsieur André Leblanc
174	282	5247207.3	275413.7	32.7	
175	284	5247216.9	275410.7	32.5	
176	286	5247226.2	275407.7	31.2	
177	287	5247230.7	275406.2	30.1	
178	288	5247235	275404.1	28.6	fin de la 4 ^{ème} translation
179	289	5247239.1	275402.2	26.7	Passage à travers un chenal de grande taille
180	290	5247244.1	275400.7	26.3	
181	291	5247248.6	275399.1	26.6	
182	293	5247257.3	275395.6	30.0	
183	298	5247281.6	275390.9	33.1	
184	304	5247311.1	275385.9	34.3	
185	320	5247387.8	275363.0	35.3	
186	325	5247411.7	275356.6	35.1	
187	333	5247449.8	275344.8	36.2	
188	336	5247463.8	275339.3	35.3	fin de la 5 ^{ème} translation
189	337	5247468.4	275337.8	35.0	
190	339	5247477.5	275333.8	34.4	
191	348	5247519.8	275318.0	37.4	
192	354	5247546.1	275304.0	37.7	
193	368	5247609.4	275275.7	38.8	
194	384	5247684.5	275247.7	39.4	fin de la 6 ^{ème} translation
195	389	5247708.7	275241.6	39.8	
196	399	5247757.3	275230.9	38.9	
197	409	5247805.5	275219.6	36.3	
198	416	5247839.1	275210.5	38.6	
199	422	5247868	275202.1	38.9	
200	432	5247915.2	275186.8	36.3	fin de la 7 ^{ème} translation
201	439	5247949	275176.5	35.5	
202	445	5247977.9	275169.4	33.2	
203	449	5247997.5	275165.4	34.1	
204	469	5248094.1	275139.5	35.5	
205	480	5248146.6	275123.6	35.5	fin du profil

Annexe V : position des stations TEM

Station TEM	Latitude	Longitude
Etan01	47.35186874	-61.89069008
Etan02	47.35187327	-61.89006756
Etan03	47.3555515	-61.88855723
Etan04	47.35643763	-61.8881559
Etan05	47.35911867	-61.88762943
Etan06	47.36010622	-61.88793847
Etan07	47.35939284	-61.88778165
Etan08	47.37095743	-61.89265757
Etan09	47.37114569	-61.89275907
Etan10	47.36376861	-61.89230846
Etan11	47.36271861	-61.89190068
Etan01j	47°21'6.60"N	61°53'24.30"O
Etan02j	47°21'22.80"N	61°53'17.20"O
Etan03j	47°22'30.60"N	61°53'41.70"O
Etan04j	47°21'57.10"N	61°53'58.40"O
Etan05j	47°22'0.20"N	61°53'59.60"O
Fat01	47.41515052	-61.90858494
Fat01	47.41512503	-61.90857086
Fat02	47.40741838	-61.90803275
Fat03	47.40005764	-61.90601765
Fat04	47.41149316	-61.90653557
Fat01j	47°24'3.10"N	61°54'14.70"O
Fat02j	47°24'36.90"N	61°54'9.50"O
Fat03j	47°24'14.10"N	61°54'27.30"O
Fat04j	47°23'52.60"N	61°53'10.00"O

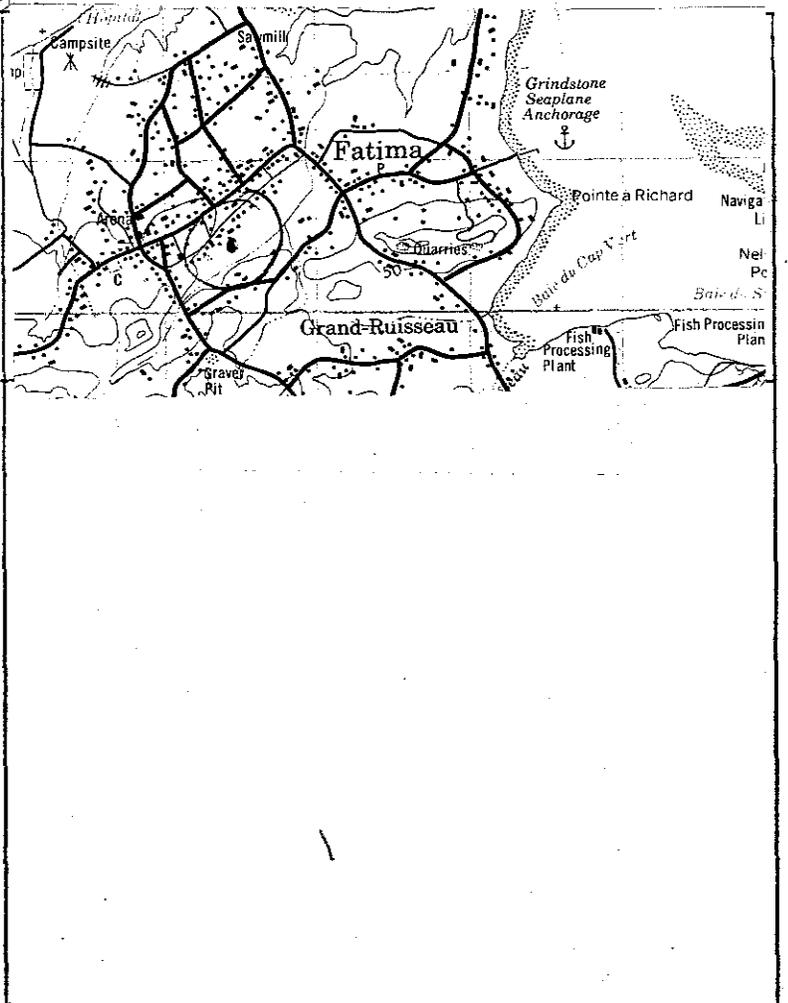
Annexe VI : forages d'Étang-du-Nord et de Fatima : localisation et géologie



IDENTIFICATION

NO DE STATION: FATIMA
 NO INFORMATIQUE: 010802901
 NO DU TERRAIN: 174 (130004)

SCHEMA DE LOCALISATION



PROPRIETAIRE

NOM:

PRENOM:

RANG, ROUTE OU RUE:

PAROISSE: Fatima

COMTE: Iles de la Madeleine

NO DE CADASTRE:

NO DE LOT:

LOCALISATION: X: 583.45

Y: 5250.45

LONGITUDE: 61° 53' 38"

LATITUDE: 47° 24' 13"

ZONE UTM: 20

BASSIN VERSANT: (1) (Iles de la Madeleine) ^{Region hydrographique (3)}

FEUILLET TOPOGRAPHIQUE: N.N.05.N0
 (1:50,000)

PUITS

ALTITUDE DU ^{TUBAGE} ~~TERRAIN~~: 49.63'

HAUTEUR DE LA MARGELLE/TERRAIN:

DIAMETRE DU PUIITS: 6"

PROFONDEUR DU PUIITS: 240'

LONGUEUR TUBEE:

INTERVALLE D'OUVERTURE:

DESCRIPTION GEOLOGIQUE:

De (pieds)	A	Matériau recoupé
0	5	Sable rouge
5	10	Grès gris à grain fin
10	45	Argilite et grès rouge
45	62	Grès rouge (petite de circulation à 48 pieds)
62	104	Siltstone rouge tendre
104	126	Grès rouge à grain fin tendre
126	240	Alternance de grès rouge et de siltstone rouge

DEBIT:

TRANSMISSIVITE:

N. STATIQUE:

DATE:

STATION

ETAT DE LA STATION: BONNE ARRACHEE UTILISEE

BOUCHEE SECHE

ESPACE ANNULAIRE: BON MEDIOCRE MAUVAIS

NOMBRE DE LECTURE DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES: 101

DATE DE LA PREMIERE LECTURE: 68/03/31 DATE DE LA DERNIERE LECTURE:

INTERVALLE DES LECTURES: HEURE 15 JOURS MOIS ANNEE AUCUNE

REMARQUES:

IDENTIFICATION

N^o DE STATION: 74-1
 NO IN. STATIQUE: 010410301
 NO DU TERRAIN: 1300-13

PROPRIETAIRE 13007086

NOM:
 PRENOM:
 RANG, ROUTE OU RUE:

PAROISSE: CAP-AUX-MEULES

COMTE: ILES DE LA MADELEINE

NO DE CADASTRE:

NO DE LOT:

LOCALISATION: X: 584,18
 Y: 5246,73

LONGITUDE: 61° 53' 02"

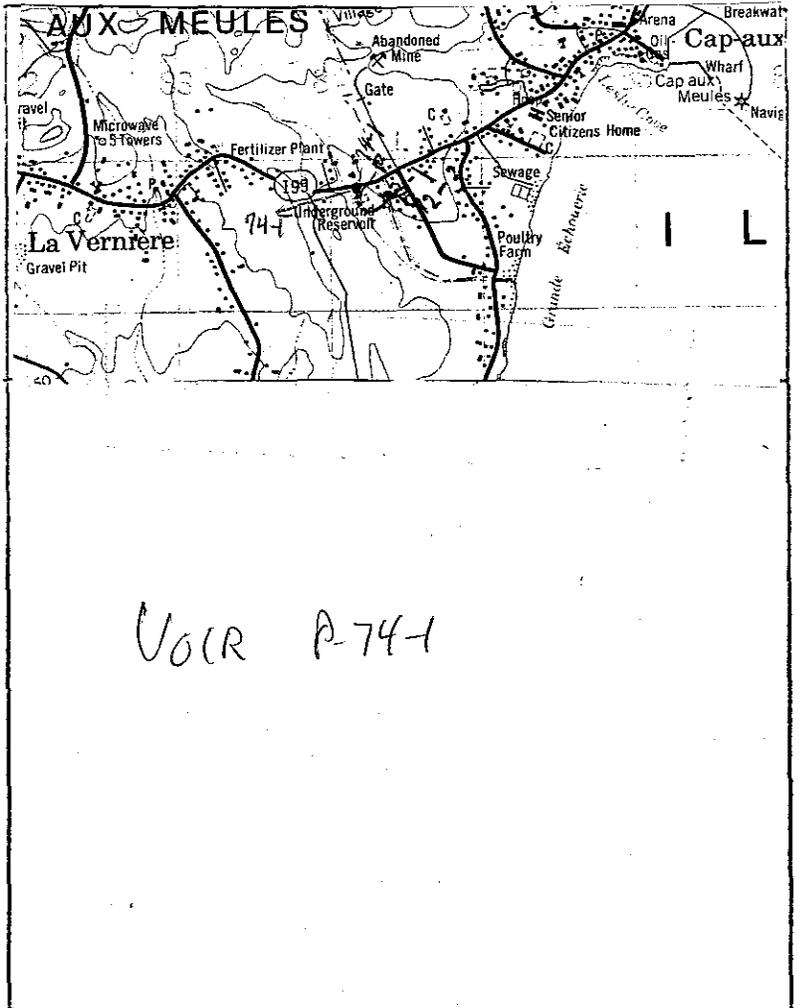
LATITUDE: 47° 22' 10"

ZONE UTM: 20

BASSIN VERSANT: 1300

FEUILLET TOPOGRAPHIQUE: 11.VO.5.S0
 (1:50,000)

SCHEMA DE LOCALISATION



PUITS

ALTEUR DU TERRAIN: 15,4 m

HAUTEUR DE LA MARGELLE/TERRAIN:

DIAMETRE DU PUIS: 6 POUCES

PROFONDEUR DU PUIS: 161,5 m

LONGUEUR TUBEE: 7 m

INTERVALLE D'OUVERTURE: 7 - 161,5 m

DESCRIPTION GEOLOGIQUE:

De	A	Matériau recoupé
0 (pieds)	2	TERRE VEGETALE
2	161,5	GRÈS FISSURÉ
.....
.....
.....
.....

DEBIT:

TRANSMISSIVITE:

N. STATIQUE:

DATE:

STATION

ETAT DE LA STATION: BONNE ✓ ARRACHEE UTILISEE

BOUCHEE SECHE

ESPACE ANNULAIRE: BON MEDIOCRE MAUVAIS

NOMBRE DE LECTURE DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES:

DATE DE LA PREMIERE LECTURE: DATE DE LA DERNIERE LECTURE:

INTERVALLE DES LECTURES: HEURE JOUR MOIS ANNEE AUCUNE

REMARQUES: