

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

Phase 2 : Caractérisation des sites : détermination des profils de références et de la méthodologie de suivi



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	4
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	9
1. INTRODUCTION	10
2. PRINCIPES DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES	13
2.1 Principe de la méthode TEM :.....	13
2.2 Principe de la diagraphie de conductivité EM.....	16
2.3 Considérations générales sur la résistivité électrique des sols.....	19
3. MESURES	21
3.1 Sondages TEM.....	21
3.2 Diagraphies :	32
3.3 Conductivité de l'eau :	32
Les conductivités électriques de l'eau dans les puits ont été mesurées à une profondeur de l'ordre de 30m par rapport à la surface du sol à l'aide de sondes enregistreuses. Les sondes enregistrent également la variation du niveau de l'eau (capteur de pression) et la température. Les mesures enregistrées numériquement sont par la suite transférées à périodes régulières et conservées par la technicienne Annick Petitpas de la Municipalité des Îles.	32
4. RÉSULTATS	33
4.1 Sondages TEM :	33
4.2 Diagraphies de conductivités EM :	42
4.3 Mesures sur carottes de forage	50
4.4 Mesures de conductivité électrique de l'eau dans les puits.	53
5. ÉTUDE SUR LA SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE TEM	55
5.1 Étude sur la résolution des paramètres du modèle de couches	55
5.2 Sensibilité de l'interprétation au nombre de couches choisi	57
5.3 Reproductibilité des mesures et des interprétations	58
5.4 Résolution de la zone de mélange	60
5.5 Limitations du modèle en couches	63
5.6 Effet de polarisation provoquée.....	64
6. ÉLÉVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE-EAU SALÉE	66
6.1 Havre-Aubert.....	68
6.2 Étang-du-Nord.....	71
6.3 Fatima	75
6.4 Havre-Aux-Maisons.....	79
6.5 Grosse-Île	82
6.6 Grande-Entrée.....	83
7. SÉLECTION DES ZONES DE SUIVI	88
8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	93
RÉFÉRENCES	95
Annexe 1 : précision de l'altitude des stations TEM	98
Annexe 2 : sondages TEM avec interprétation	100

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

<i>Annexe 3 : diagraphies EM39 des puits récents (2009) : conductivité et gamma naturel</i>	<i>124</i>
<i>Annexe 4 : détermination de la zone de mélange par sondage TEM</i>	<i>140</i>

RÉSUMÉ

Soixante treize sondages électromagnétiques transitoires (TEM) ont été réalisées entre mai 2010 et juin 2011 sur les zones des puits de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine (Havre-Aubert, Centrale, Havre-Aux-Maisons, Grosse-Île, Grande-Entrée) afin de cartographier la profondeur de la nappe salée sous les aquifères exploités. Pour mieux contrôler la qualité de l'eau, ainsi que d'aider à contraindre l'interprétation des sondages TEM, des diagraphies de conductivité électromagnétique ont été réalisées dans quatre anciens puits d'exploration et quinze puits récemment forés. L'interprétation des résultats montre que la nappe salée est associée à un niveau de résistivité faible entre 2 et 4 $\Omega\cdot\text{m}$; sa profondeur est variable allant de -40 m/nmm à Grande-Entrée à plus de -250 m/nmm à Havre-Aubert. Comme prévu par la relation de Ghyben-Herzberg, la nappe salée est à faible profondeur près des côtes et s'enfonce vers l'intérieur. Trois zones ont été identifiées pour réaliser le suivi temporel des nappes à cause du risque associé à la proximité de puits en exploitation et de la faible profondeur de la nappe ; ce sont les secteurs de Grande-Entrée, d'Étang-du-Nord-est et de Fatima-est et ouest. Les secteurs de Havre-Aux-Maisons et de Fatima-centre ont montré des réponses non conformes au modèle hydrogéologique et des forages sont recommandés pour vérifier l'origine des zones conductrices mises en évidence. Les secteurs d'Havre-Aubert et de Grosse-Île ne sont pas jugés à risque à cause de la profondeur importante de la nappe salée. Les simulations numériques ont démontré qu'il était difficile de déterminer, par sondage TEM, la présence d'une zone de mélange entre l'aquifère d'eau douce et la nappe salée d'épaisseurs respectivement inférieures à 10 m à 40 m de profondeur et inférieure à 30 m à 130 m de profondeur ; la résolution est améliorée toutefois si la résistivité de la zone de mélange est connue. Pour le suivi temporel des nappes, on recommande de réaliser des forages traversant l'interface eau douce-eau salée sur les secteurs sélectionnés, de faire des levés de diagraphie EM pour bien caractériser le niveau de cette interface, d'instrumenter les puits avec des sondes multiparamétriques (conductivité, température, pression) sur plusieurs niveaux et de déterminer à proximité des forages des sites pour

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

des sondages TEM qui seraient réalisés à périodes régulières. Un protocole pour la sélection des sites de forage est proposé.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Principe de la méthode TEM. (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).....	14
Figure 2 : principe de la diagraphie de conductivité EM (d'après le manuel de l'EM39 de Geonics Ltd.).....	17
Figure 3 : contribution du matériau encaissant à la lecture de conductivité EM en fonction de la distance à la sonde (d'après le manuel de l'EM39 de Geonics Ltd.).....	18
Figure 4 : Havre-Aubert : position des sondages TEM (en jaune) et des puits. Les puits Vigneau et Ha002 (en rouge) sont d'anciens puits d'exploration (1966) alors que les puits P1 à P4 (en vert) sont des puits de production d'eau municipale.	23
Figure 5 : Fatima : position des sondages TEM (en jaune) et des puits. Le puits FAT-13007031 (en rouge) est un anciens puits d'exploration; les puits PU1, PU2, PU3, PU4, P7 et P8 sont des puits de production (en vert) alors que les puits FAT-09-01PP, FAT-09-02PP, FAT-09-03PP et FAT-09-04PP (en rouge) sont des puits récents (2009) en attente de certification.....	24
Figure 6 : Étang-du-Nord : position des sondages TEM (en jaune) et des puits (en vert). Les nouveaux puits réalisés en 2009 et en attente de certification sont indiquées en rouge. .	25
Figure 7: Havre-Aux-Maisons : position des sondages TEM (en jaune) et des puits municipaux de production d'eau (en vert). Les puits indiqués en rouge sont les nouveaux puits (2009) en attente de certification.	26
Figure 8 : Grosse-Île : position des sondages TEM (en bleu).....	27
Figure 9 : Grande-Entrée : position des sondages TEM (en jaune) et des puits en attente de certification (en vert).....	28
Figure 10 : interprétation du sondage EDN17 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.	30
Figure 11 : interprétation du sondage EDN17 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.	31
Figure 12 : EDN17 : interprétation 1D (4 couches) à l'aide du logiciel SEMDI-SITEM d'Aarhus Geophysics. Le graphique à droite en haut représente les données observées et la courbe calculée à partir du modèle de couches dont les paramètres sont donnés dans le tableau en bas. Le graphique de gauche en haut représente la distribution des résistivités avec la profondeur.	31

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Figure 13 : Havre-Aubert : exemples de sondages HA01 (haut) et HA03 (bas) avec interprétation sous forme de couches	34
Figure 14 : Havre-Aubert : interprétation 1D (sous forme de couches) du sondage HA10. Noter la différence de comportement avec la station HA01. Ici une zone conductrice (7.2 Ω .m) est détectée à une profondeur de \sim 69 m.....	35
Figure 15 : sondage ETAN17 d'Étang-du-Nord : données et interprétation à l'aide du logiciel SITEM-SEMDI d'AG. À noter la relation entre la diagraphie en forage et l'interprétation TEM	36
Figure 16 : Fatima : sondages FAT03 (bas) près du puits P8 à l'est, et FAT12 (haut) dans la partie ouest, près du puits FAT-09-03PP	37
Figure 17 : Havre-Aux-Maisons : quelques sondages du secteur montrant la variation entre les sondages du sud et les autres. Les pentes aux temps longs sont plus prononcée et arrive plus tôt au sud.....	38
Figure 18: Grosse-Île : sondages GI01 (haut) et GI03 (bas). À noter : les données aux temps courts (entre 10 et 30 μ s) sont bruitées et elles ont été masquées lors de l'édition.	40
Figure 19: Grande-Entrée : sondages GE01 (haut) et GE05 (bas) avec interprétation en terrain à 3 couches. La nappe salée (3.7 Ω .m) est détectée entre 35 et 43 m de profondeur.....	41
Figure 20 : Puits Vigneau (Havre-Aubert). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.....	44
Figure 21 : Hav002 (Havre-Aubert). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel. La stratigraphie du site n'est pas disponible pour ce forage.....	45
Figure 22 : 13007031 (Fatima). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.	46
Figure 23 : 13007086 (Cap-Aux-Meules). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.....	47
Figure 24 : carottes de grès rouge (porosité de 15-25%) du forage pétrolier G-003 provenant de diverses profondeurs, sciées et surfacées. La profondeur (en pieds) est indiquée au feutre bleu sur la surface latérale des carottes.	51
Figure 25 : a) porte-échantillon permettant d'introduire une carotte de grès, de la saturer avec une solution de concentration choisie et de faire les mesures de résistivité électrique; b) vue du montage incluant un réservoir amont, le porte-échantillon et un réservoir aval.	52
Figure 26 : sondage TEM GE01 : la courbe du diagramme en haut à droite représente la courbe de résistivité apparente en fonction du temps; la courbe de gauche, le profil de résistivité des couches en fonction de la profondeur; finalement, dans la partie du bas, le tableau indique les paramètres déterminés pour chaque couche du modèle ainsi que les erreurs.	55
Figure 27 : GE05 (Grande-Entrée) : résistivités apparentes observées et interprétation sous forme de modèles à 2, 3 ,4 et 5 couches. Si les zones supérieures (aquifère d'eau douce) sont plus ou moins bien déterminées, la profondeur à la zone de 3-4 ohm.m (eau salée) est bien déterminée (34-37 m).....	58

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Figure 28: reproductibilité des sondages: sondage EDN02 (Étang-du-Nord). Le sondage EDN02 a été enregistré à deux occasions (mai et juin 2010) avec le même équipement et les mêmes paramètres d'acquisition. Les données se superposent presque parfaitement et l'interprétation est presque identique. Un très léger écart peut s'expliquer par une différence de positionnement de la station d'au maximum 20 m.	60
Figure 29: sondage FAT01 : effet de polarisation provoquée aux temps longs (>5 ms) qui provoque une inversion de polarité des données (de positive à négative); a) (haut) dérivée de la composante verticale du champ secondaire; (b) (bas) résistivité apparente calculée à partir de la composante verticale du champ secondaire.	65
Figure 30 : relation de Ghyben-Herzberg pour l'élévation sous le niveau moyen des mers de l'interface eau douce/eau salée	68
Figure 31 : carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Havre-Aubert	69
Figure 32: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Étang-du-Nord	72
Figure 33: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Fatima	76
Figure 34: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Havre-Aux-Maisons	79
Figure 35 : modèles de résistivité obtenus sur trois profils nord-sud de tomographie de résistivité par Madelin'Eau (2004). Noter les zones étroites conductrices à 40 m de profondeur au droit de la faille présumée.	82
Figure 36: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Grosse-Île	83
Figure 37: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Grande-Entrée	84
Figure 38 : sections 2D de résistivité électrique obtenues par tomographie électrique (Madelin'Eau, 2004) sur Grande-Entrée. Noter l'enfoncement de la nappe salée (en bleu) du nord vers le sud sur le rivage nord.	85
Figure 39 : Grande-Entrée : section des résistivités électriques obtenues par sondage TEM sur un profil NE-SO. La ligne bleue délimite l'interface eau douce-eau salée.	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : distribution des sondages TEM sur les Îles-de-la-Madeleine	22
Tableau 2 : profondeurs des diagraphies de conductivité EM dans les puits anciens d'exploration	42
Tableau 3 : salinité de l'eau et qualité	52
Tableau 4 : conductivités et températures moyennes dans les puits.....	53
Tableau 5 : comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la conductivité des formations de grès.....	54
Tableau 6 : paramètres du modèle de résistivité 4 couches incluant la zone de mélange (modèle Étang-du-Nord).....	61
Tableau 7 : paramètres du modèle de résistivité 4 couches incluant la zone de mélange (modèle Grande-Entrée).....	61
Tableau 8 : Havre-Aubert : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	70
Tableau 9 : Havre-Aubert : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg	70
Tableau 10 : Étang-du-Nord : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	73
Tableau 11 : Étang-du-Nord : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg	74
Tableau 12 : Fatima : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	77
Tableau 13 : Fatima : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg.....	78
Tableau 14 : Havre-Aux-Maisons : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	80
Tableau 15 : Havre-Aux-Maisons : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg	80
Tableau 16 : Grosse-Île : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	87
Tableau 17 : Grande-Entrée : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline	87
Tableau 18 : Grande-Entrée : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg	87

1. INTRODUCTION

Situé en plein cœur du golfe du Saint-Laurent, l'archipel des Îles-de-la Madeleine 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 considérée 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 octroyé en 2009 un contrat au Laboratoire de Géophysique (LAGA) de l'École Polytechnique de Montréal pour la réalisation de travaux géophysiques afin de déterminer la présence de nappes d'eau salée et les cartographier. Des levés par méthodes électriques (tomographie de résistivité) et électromagnétiques (sondages TEM) ont eu lieu durant six missions, de mai 2009 à juin 2010. Les résultats présentés dans le rapport final en juin 2010 ont montré que les deux méthodes étaient tout indiquées pour le problème. La méthode ERT permet une détermination de la distribution des résistivités avec une haute résolution sur les premiers 70 m d'épaisseur. Au-delà de cette profondeur, la méthode TEM est plus avantageuse et plus facile à opérer et elle a permis de mettre en évidence la nappe salée à l'Étang-du-Nord et Fatima entre 40 et 200 m de profondeur.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Suite à cette première phase de validation des méthodes, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec a mandaté le LAGA en 2010 pour étendre ces études aux autres îles (Havre-Aubert, Havre-Aux-Maisons, Grande Entrée et Gross île) en réalisant des travaux géophysiques par méthode TEM et diagraphies de conductivité électromagnétique en forage. L'objectif de la Phase II était de développer une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les principales îles habitées de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, comprenant notamment le nombre de stations de suivi à installer, leur localisation, le type de mesure à réaliser, la profondeur et la fréquence des levés. Le protocole de suivi devait décrire les étapes à réaliser pour suivre l'évolution de l'interface eau douce/eau salée par l'utilisation de méthodes géophysiques ainsi que par l'installation de sondes mesurant la conductivité électrique et le niveau d'eau à l'intérieur de puits d'observation. La localisation et la profondeur des puits d'observation seraient déterminées sur la base des résultats obtenus par les profils des essais géophysiques. Les travaux de la Phase II constituaient la dernière étape avant la mise en place des stations permanentes de suivi prévue à la Phase III du projet.

Afin d'atteindre cet objectif, on a réalisé les travaux suivants :

- Réalisation de 48 sondages TEM sur les îles de Cap-Aux-Meules, du Havre-Aubert, du Havre-Aux-Maisons, de Grande-Entrée et de Grosse-Île.
- Caractérisation des propriétés des formations géologiques par des mesures in situ (diagraphies de conductivité électromagnétique et de rayonnement gamma dans les forages existants) et par des mesures sur carottes de grès rouge prélevées en 1999 lors d'un forage pétrolier près du secteur de Fatima.
- Mesures de conductivité électrique de l'eau par des sondes de conductivité.

Ce rapport est divisé en huit (8) parties : Après l'Introduction (Paragraphe 1), nous présentons au paragraphe 2 les principes qui animent les méthodes géophysiques utilisées; puis au paragraphe 3, nous faisons la description des travaux réalisés et leur

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

localisation. Par la suite, nous présentons tous les résultats obtenus au paragraphe 4. Au paragraphe 5, nous discutons des aspects de reproductibilité des mesures, la résolution des épaisseurs et des résistivités, et les incertitudes sur les résultats. Au paragraphe 6, nous établissons les cartes des élévations à l'interface eau douce - eau saline et nous discutons du degré de confiance en intégrant d'autres données hydrogéologiques. Au paragraphe 7, nous sélectionnons les zones propices à recevoir des stations permanentes de suivi temporel de la nappe saline. Finalement, nous concluons (paragraphe 8) en formulant des recommandations sur les travaux de la Phase III.

2. PRINCIPES DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES

2.1 Principe de la méthode TEM :

La technique TEM est une méthode de sondage électromagnétique. Elle permet d'étudier le sous-sol à l'aide de l'induction électromagnétique produite par la coupure abrupte 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 1a, en rouge). Le courant est injecté sous la forme d'une onde créneau (figure 1b). 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 1a, 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 profondeur de ces boucles de courant à un instant t est donnée par la relation suivante (Nabighian, 1979) :

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{4t}{\sigma\mu}} \quad (1)$$

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

coincident) soit à l'aide d'une boucle réceptrice plus petite placée au centre (figure 1a 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.

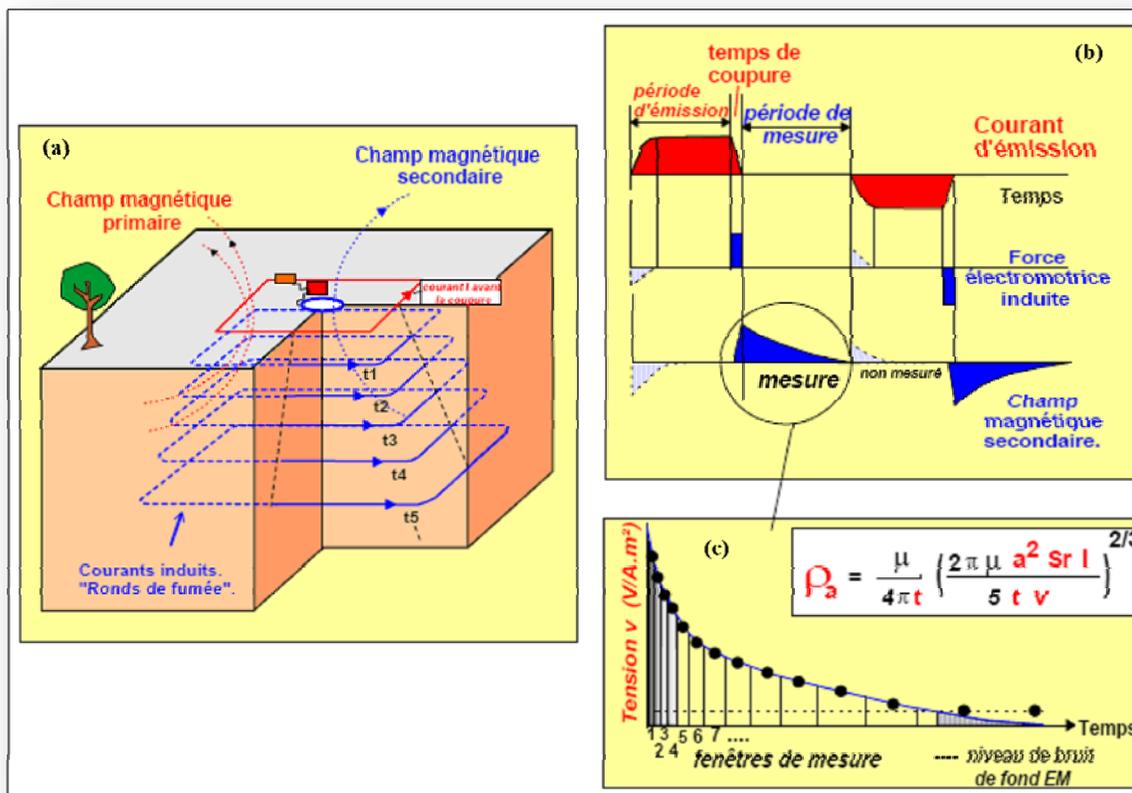


Figure 1: Principe de la méthode TEM. (a) Diffusion des boucles de courant dans le sol après la coupure du courant injecté; (b) Forme de l'onde de courant injectée avec la force électromotrice générée dans le sol lors de la coupure du courant; (c) Illustration de l'échantillonnage du signal mesuré (adapté de McNeil, 1990)

À cause du passage rapide des courants de Foucault à travers les milieux résistants, la méthode TEM est peu 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) :

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

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 TEM, 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.

Les 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. La 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 m^2) 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 TEM est très indiquée pour mettre en évidence les couches conductrices; par contre elle souffre de cécité pour détecter les zones résistantes.

2.2 Principe de la diagraphie de conductivité EM

La diagraphie de conductivité EM permet de déterminer le profil de résistivité des unités stratigraphiques le long d'un forage sans contact direct avec les parois. Cette mesure de conductivité est réalisée par la génération de courants induits dans les formations autour du forage à l'aide d'une bobine émettrice émettant un champ électromagnétique à une fréquence unique de 39.2 KHz pour l'équipement EM-39 (Geonics Ltd) utilisé dans ce projet (figure 2). Le champ secondaire généré par les courants induits est proportionnel à la conductivité du sol et est mesuré à l'aide d'une seconde bobine. Les deux bobines sont distantes de 50 cm dans la sonde descendue dans le forage à l'aide d'un câble à multiples conducteurs. La vitesse de mesure à la montée ou à la descente est contrôlée à l'aide d'un treuil programmé par un ordinateur. La portée (ou distance d'investigation) est de l'ordre de 1.5 m au tour du forage. La figure 3 montre la contribution du sous-sol autour de la sonde à la lecture. La conductivité mesurée par la sonde est peu influencée par la colonne d'eau dans le puits et elle représente la conductivité effective de la formation autour du puits.

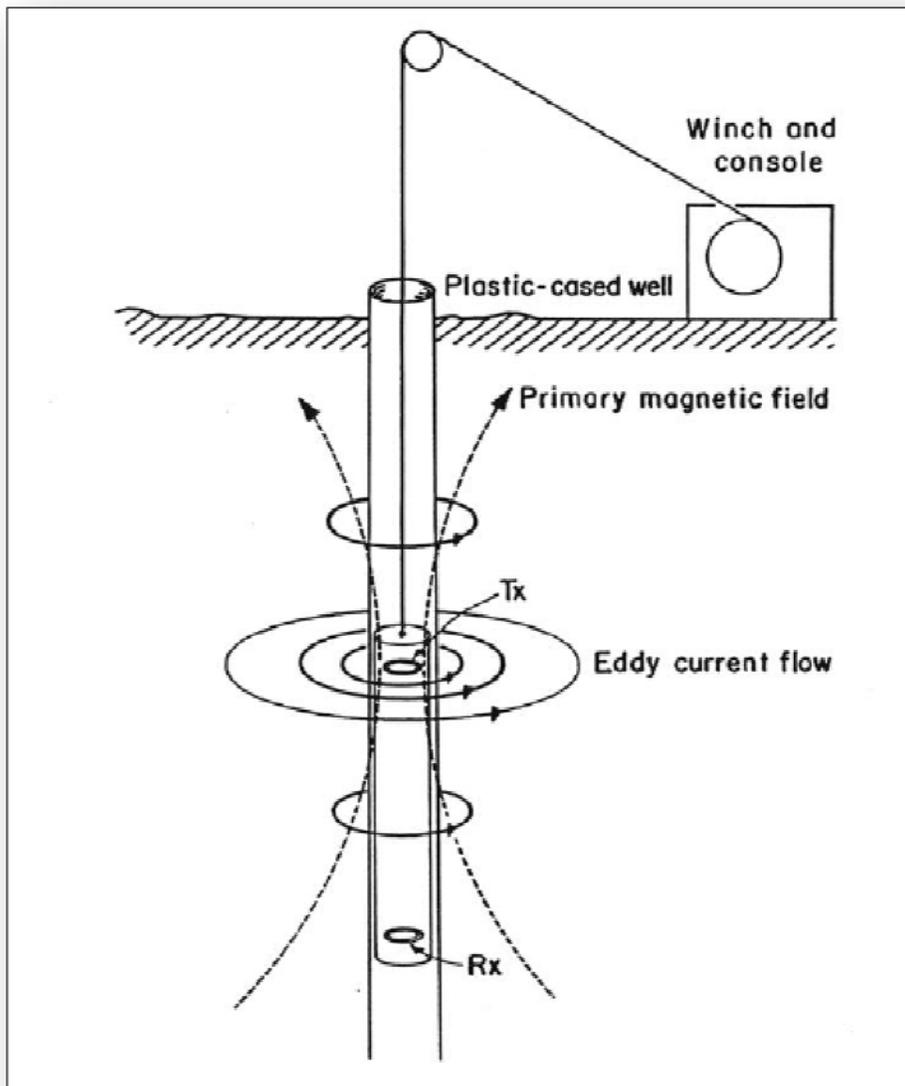


Figure 2 : principe de la diagraphie de conductivité EM (d'après le manuel de l'EM39 de Geonics Ltd.)

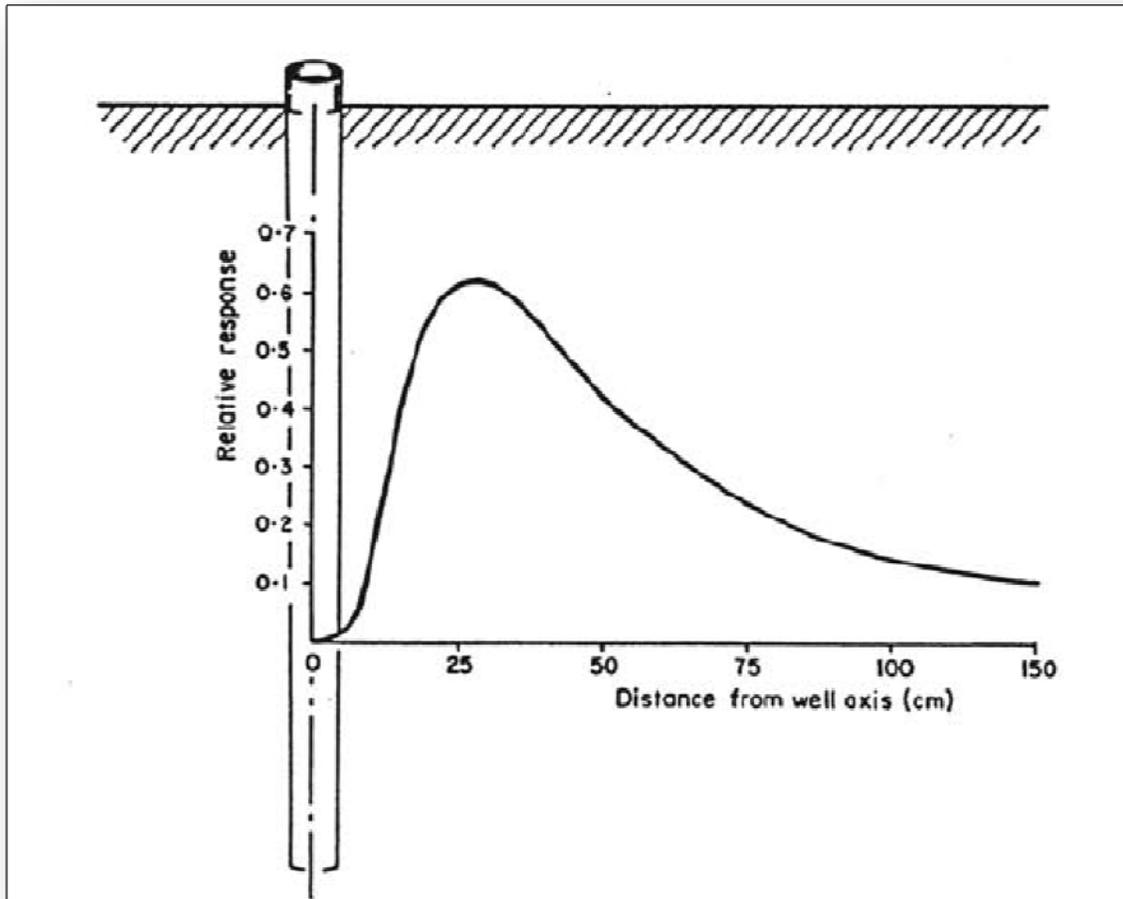


Figure 3 : contribution du matériau encaissant à la lecture de conductivité EM en fonction de la distance à la sonde (d'après le manuel de l'EM39 de Geonics Ltd.).

Une autre sonde, dite de gamma naturel, a été utilisée avec le même système de mesure. Cette sonde est connectée à la place de la sonde de conductivité EM et permet de mettre en évidence le rayonnement gamma émis par les formations intersectées par le forage. La mesure consiste en nombre de comptes par seconde intégré sur une fenêtre de 2 à 5 secondes. La principale source de rayonnement gamma dans les terrains sédimentaires qui caractérisent les Îles est l'isotope K^{40} du potassium. Les grès sont en général constitués de quartz et le compte est bas sauf lorsqu'il y a présence d'argile.

2.3 Considérations générales 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 entre 20 et 30% (Groupe Madelin' Eau, Rapport final, Document No 2, 2004, p 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 :

$$\underline{\rho_{app} = a \rho_w \phi^{-m}} \quad (3)$$

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). L'exposant m est connu sous le nom de facteur de cimentation et varie entre 1.4 et 1.9 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 1.95-2.00 (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 :

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S_r^{-B} \quad (4)$$

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 10 milliSiemens/cm ou 1.0 S/m), tandis que l'eau douce a une conductivité de moins de 0.2 mS/cm (20 mS/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):

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18^\circ)} \quad (5)$$

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

3. MESURES

3.1 Sondages TEM

Quarante huit (48) sondages TEM ont été réalisés pendant la Phase II sur les îles de Havre-Aubert, de Havre-Aux Maisons, de Grosse-Île, de Grande-Entrée et sur l'Île Centrale. Cette dernière a fait l'objet de mesures au nord (secteur de Fatima) et au sud (secteurs de Cap-Aux-Meules et d'Étang-du-Nord). Avec les vingt-cinq (25) sondages déjà réalisés dans la deuxième partie de la Phase I (Chouteau et al, 2010), ce sont soixante-treize (73) sondages

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

TEM qui ont été distribués sur les cinq îles. Les mesures ont été réalisées lors de trois (3) campagnes dans la Phase 2 (octobre 2010, mai et juin 2011) et deux (2) campagnes dans la Phase 1 (mai et juin 2010). La répartition des sondages est donnée au tableau 1.

Tableau 1 : distribution des sondages TEM sur les Îles-de-la-Madeleine

HA	EDN	FAT	HAM	GI	GE
12	22	13	14	4	8

Dans la Phase II, on a privilégié les sondages à proximité des puits et piézomètres existants sur les îles et cela pour deux raisons : d'abord pour pouvoir comparer les résultats avec les informations géologiques et hydrogéologiques disponibles et, ensuite, pour pouvoir contraindre les interprétations des sondages TEM par les mesures de conductivité électrique réalisées à l'aide de diagraphie EM dans les puits.

L'objectif premier des sondages TEM sur les Îles était de déterminer la profondeur aux nappes salines, et secondairement, de déterminer la qualité de l'aquifère alimentant les puits d'alimentation en eau.

La localisation des sondages TEM ainsi que celle des forages visités sont indiquées sur les figures 4, 5, 6, 7, 8 et 9 pour les îles de Havre-Aubert (HA), de Fatima (FAT), d'Étang-du-Nord (EDN), d'Havre-Aux-Maisons (HAM), de Grosse-Île (GI) et de Grande-Entrée (GE) respectivement. Les positions des stations TEM ainsi que celles des puits visités sont listées dans les tableaux du chapitre 6 (tableaux 7 à 17). La localisation des stations a été réalisée à l'aide d'un GPS Garmin avec une précision de 5-8 m en x et y (ou l'équivalent en latitude et en longitude). Il est à noter que les altitudes des sites TEM ont été déterminées à l'aide d'un modèle numérique de terrain grâce à l'application API Google Elevation de Google. La précision des altitudes ainsi obtenues a été déterminée par une analyse statistique des altitudes des points retournés par l'application API Elevation et celles

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

connues par arpentage de précision aux puits disponibles. Le lecteur trouvera des détails de cette analyse à l'annexe A1. La précision de l'altitude est évaluée à ± 2 m.



Figure 4 : Havre-Aubert : position des sondages TEM (en jaune) et des puits. Les puits Vigneau et Ha002 (en rouge) sont d'anciens puits d'exploration (1966) alors que les puits P1 à P4 (en vert) sont des puits de production d'eau municipale.

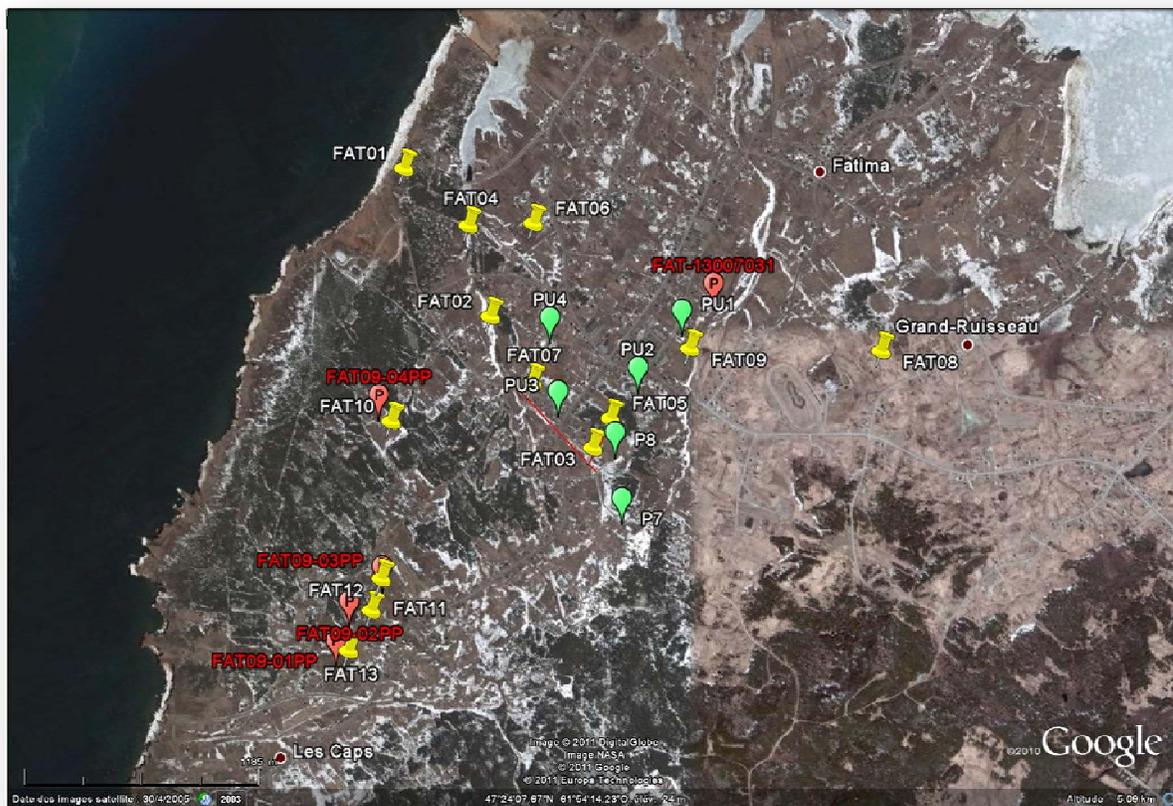


Figure 5 : Fatima : position des sondages TEM (en jaune) et des puits. Le puits FAT-13007031 (en rouge) est un anciens puits d'exploration; les puits PU1, PU2, PU3, PU4, P7 et P8 sont des puits de production (en vert) alors que les puits FAT-09-01PP, FAT-09-02PP, FAT-09-03PP et FAT-09-04PP (en rouge) sont des puits récents (2009) en attente de certification.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)



Figure 6 : Étang-du-Nord : position des sondages TEM (en jaune) et des puits (en vert). Les nouveaux puits réalisés en 2009 et en attente de certification sont indiquées en rouge.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)



Figure 7: Havre-Aux-Maisons : position des sondages TEM (en jaune) et des puits municipaux de production d'eau (en vert). Les puits indiqués en rouge sont les nouveaux puits (2009) en attente de certification.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

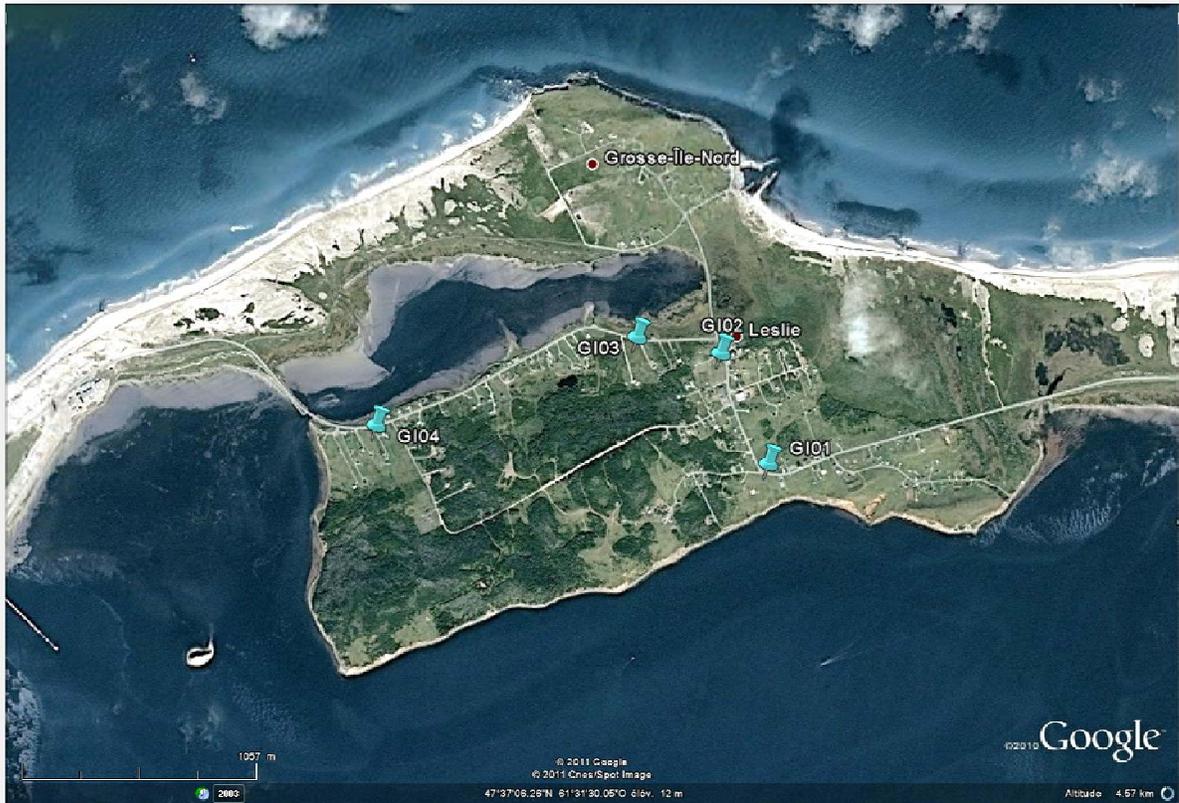


Figure 8 : Grosse-Île : position des sondages TEM (en bleu)

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

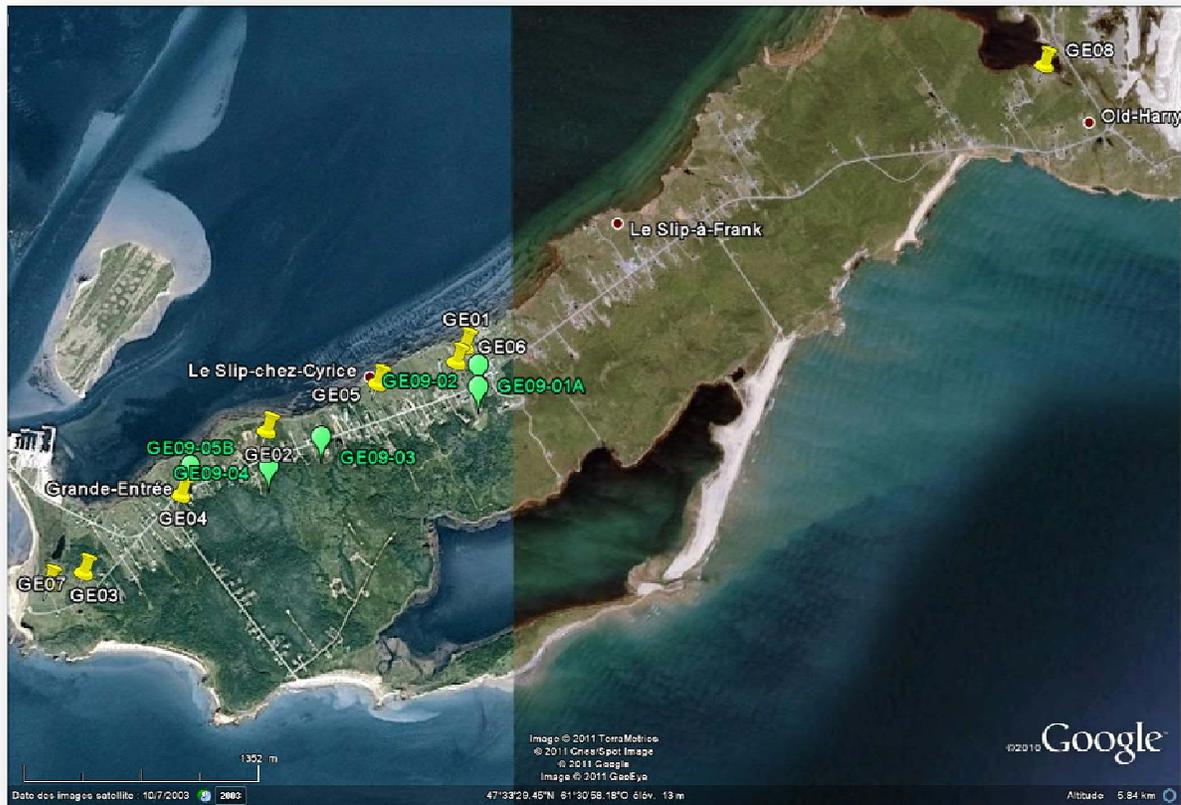


Figure 9 : Grande-Entrée : position des sondages TEM (en jaune) et des puits en attente de certification (en vert).

L'équipement utilisé est 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. La gamme de profondeur est déterminée par le moment magnétique disponible (produit surface de la boucle de transmission x courant) et par la fréquence de répétition des impulsions de courant. Le TEM47 possède trois fréquences de base ($U = 285\text{Hz}$, $V = 75\text{Hz}$ et $H = 30\text{Hz}$) et permet d'injecter un courant maximum de 3 A alors que le TEM57 a des fréquences de 30 Hz, 7.5 Hz et 3 Hz et peut injecter jusqu'à 20 A.

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

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

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. La gamme des temps mesurés après coupure du champ primaire s'étend de 6.8 μ s à 80 ms (soit de 6.8×10^{-6} s à 80×10^{-3} s).

Les sondages ont été interprétés principalement à l'aide de deux logiciels d'inversion 1D (modèle tabulaire), WinGlink (Geosystems) et SITEM-SEMDI d'Aarhus Geophysics (AG en abrégé). Le logiciel WinGlink 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 (inversion dite « Occam »), 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. Le logiciel SITEM-SEMDI permet de faire l'interprétation des courbes de sondages TEM sous forme de couches tout en calculant la résolution sur les paramètres trouvés (résistivités, épaisseurs, profondeurs) par inversion; WinGlink ne permet pas de donner un estimé de la résolution. Aux figures 10 et 11, on montre les exemples d'interprétation sous les deux approches dans WinGlink pour la station EDN17 (Cap-Aux-Meules) pour le sondage utilisant le TEM47 et pour celui utilisant le TEM57. Par comparaison, on présente à la figure 12 les résultats obtenus pour le même sondage, incluant les données EM47 et EM57, avec le logiciel SITEM-SEMDI d'AG.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

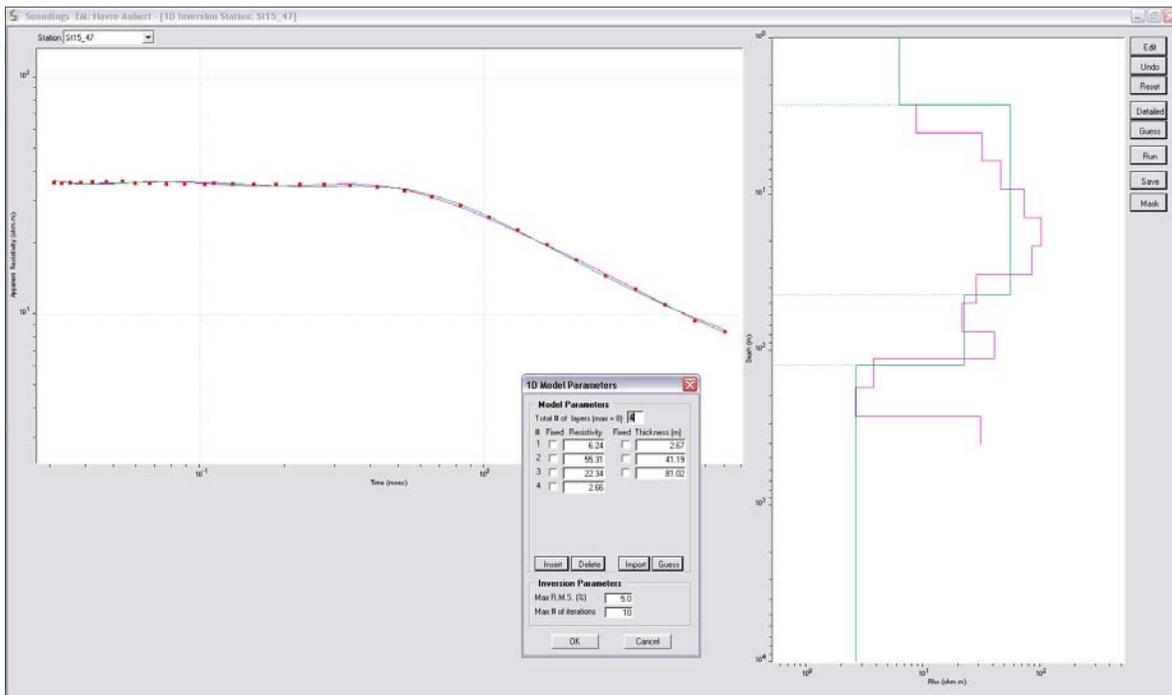
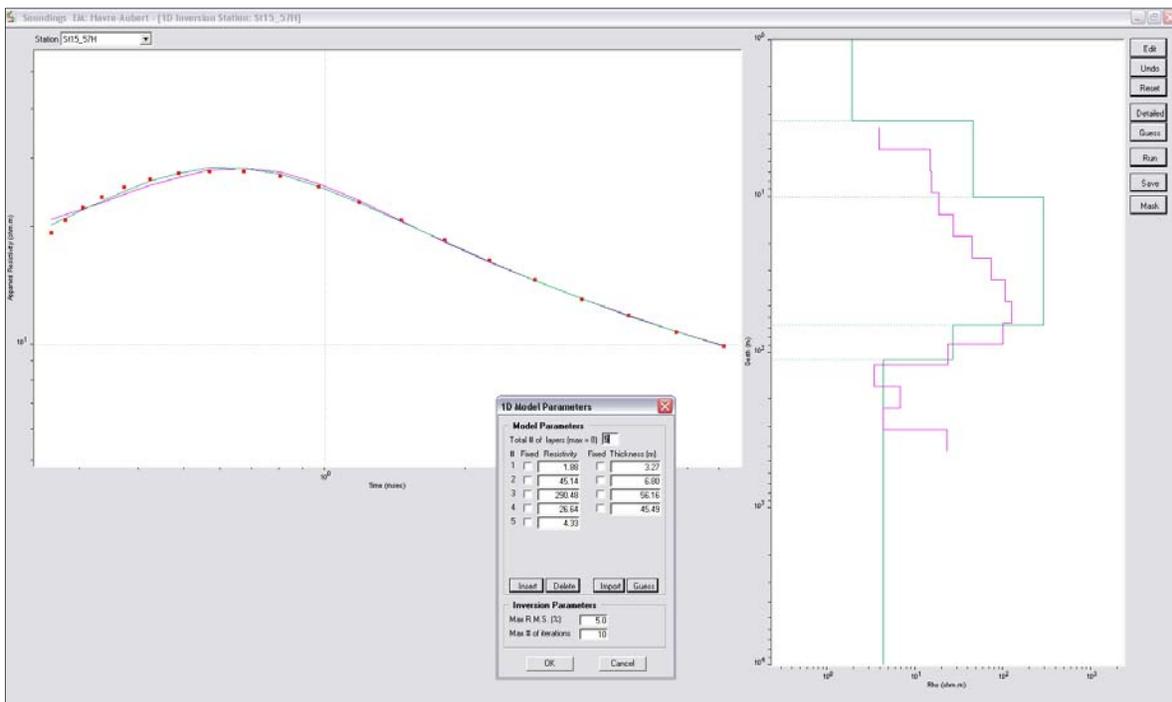


Figure 10 : interprétation du sondage EDN17 à partir des données acquises en utilisant le TEM47. La courbe rose correspond à l'interprétation sous forme de résistivité graduelle; la courbe verte correspond à l'interprétation sous forme de couches présentant des contrastes de résistivité marqués. Les résistivités et épaisseurs des couches pour cette approche sont indiquées dans l'encadré.



Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Figure 11 : interprétation du sondage EDN17 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.

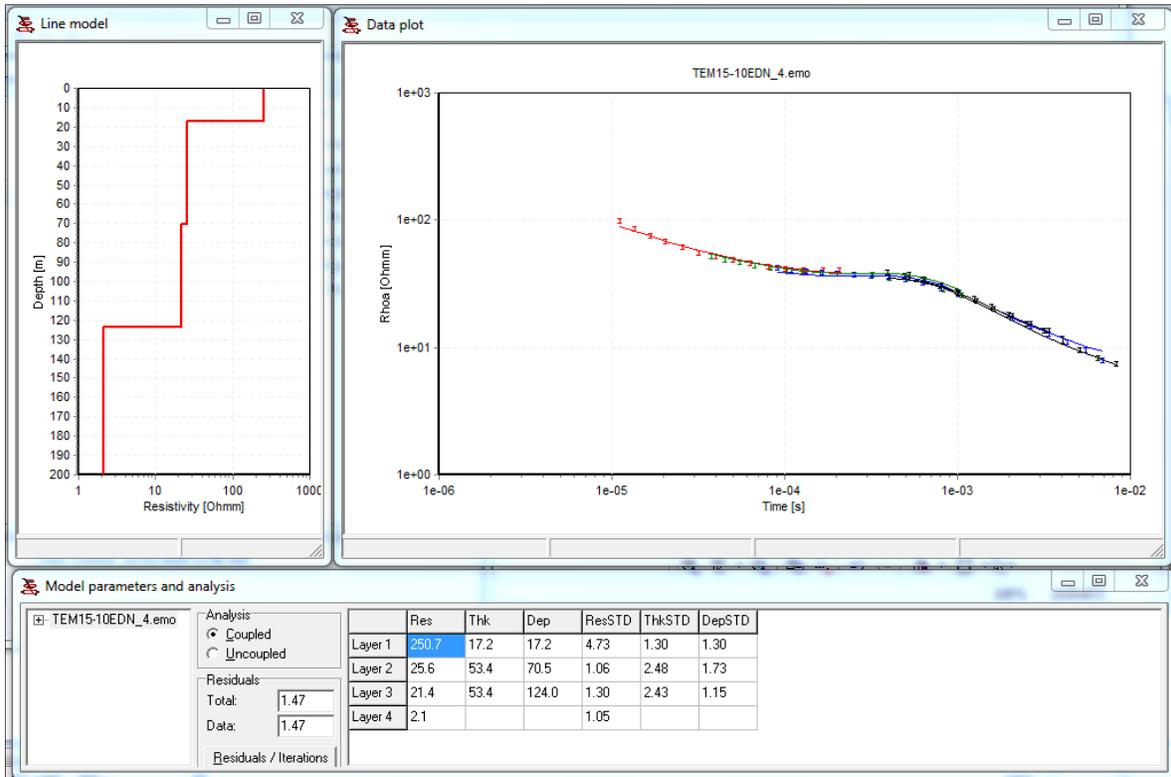


Figure 12 : EDN17 : interprétation 1D (4 couches) à l'aide du logiciel SEMDI-SITEM d'Aarhus Geophysics. Le graphique à droite en haut représente les données observées et la courbe calculée à partir du modèle de couches dont les paramètres sont donnés dans le tableau en bas. Le graphique de gauche en haut représente la distribution des résistivités avec la profondeur.

Pour la station EDN17, que ce soit pour les données associées au TEM47 ou au TEM57, on trouve l'eau salée (résistivité de 2-3 $\Omega.m$) à une profondeur de \sim 120-124 m. Au-dessus, une zone de mélange d'environ 20 m d'épaisseur à 20 $\Omega.m$ fait le tampon avec la couche aquifère d'eau douce de 60-100 $\Omega.m$. Il est à noter que l'épaisseur et la résistivité réelle de la zone de mélange n'est pas déterminée de manière unique par l'inversion des données.

3.2 Diagraphies :

Les diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel ont été réalisés dans les puits anciens encore accessibles et dans les nouveaux puits forés en 2009 (Rapports du groupe Madelin'Eau, 2009, 2010). En général les profondeurs des puits varient entre 40 et 60 m à l'exception du puits Vigneau (Havre-Aubert; ~73 m) et du puits 13007086 de Cap-Aux-Meules (~ 91 m).

3.3 Conductivité de l'eau :

Les conductivités électriques de l'eau dans les puits ont été mesurées à une profondeur de l'ordre de 30m par rapport à la surface du sol à l'aide de sondes enregistreuses. Les sondes enregistrent également la variation du niveau de l'eau (capteur de pression) et la température. Les mesures enregistrées numériquement sont par la suite transférées à périodes régulières et conservées par la technicienne Annick Petitpas de la Municipalité des Îles.

4. RÉSULTATS

4.1 Sondages TEM :

Les interprétations de tous les sondages TEM sont données à l'annexe A3 par secteur d'étude (Havre-Aubert, Étang-du-Nord, Fatima, Havre-Aux-Maisons, Grosse-Île et Grande-Entrée).

4.1.1 Secteur de Havre-Aubert

La figure 13 montre deux exemples de sondage TEM typiques sur le secteur de Havre-Aubert. De manière générale, les sondages de Havre-Aubert ne montrent pas de zone conductrice à 2-3 ohm.m en profondeur. Après la zone non-saturée de surface, la méthode voit un milieu relativement homogène de ~40 ohm.m correspondant à la résistivité de l'aquifère d'eau douce sur les îles. L'effet P.P. (voir explications du phénomène au paragraphe 5.6) se voit plus tôt sur les sondages que partout ailleurs dans les îles, typiquement pour $t > 3$ ms. L'effet P.P. se voit aux temps longs lorsque les courants induits par le champ émis sont trop faibles et que les courants de dépolarisation créent un champ magnétique mesurable. Ceci n'arrive que dans les terrains résistifs sur de très grandes épaisseurs. Les sondages HA10 (figure 14) et HA11 semblent montrer une zone conductrice à 69 m de profondeur et se distinguent des réponses des autres sondages TEM du secteur. De fait, l'observation des composantes horizontales X et Y du champ secondaire (voir explications paragraphe 5.5) nous indique que c'est la conséquence d'un effet latéral de résistivité à proximité de ces deux stations, possiblement des clôtures ou des conduites enfouies. En général, pour les autres sondages, l'absence de conducteur sur la profondeur de pénétration de la méthode indique que la nappe salée est à plus de 250 m de profondeur.

On trouvera au tableau 5 du paragraphe 6 les principales conclusions de l'interprétation des sondages de Havre-Aubert.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

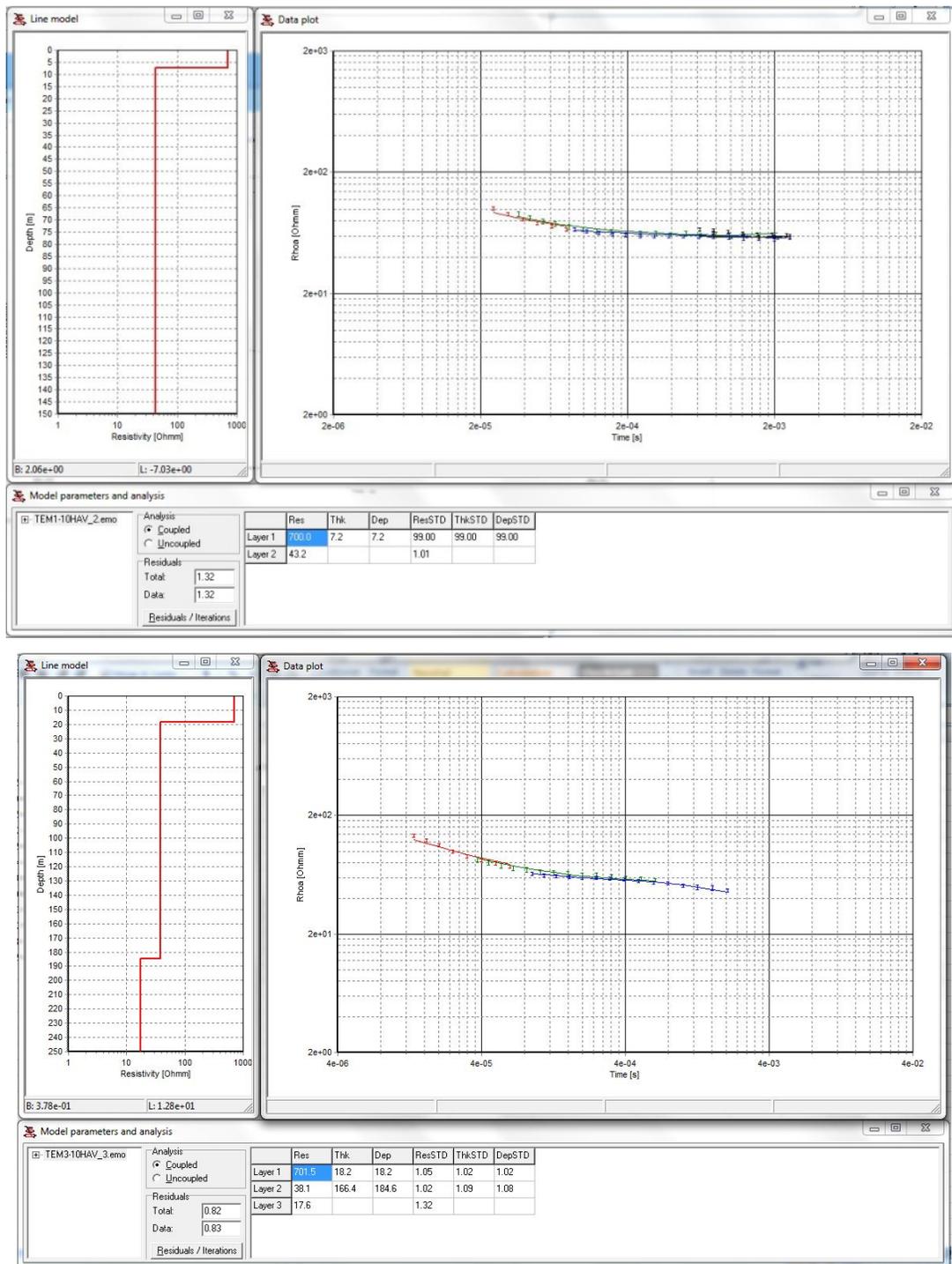


Figure 13 : Havre-Aubert : exemples de sondages HA01 (haut) et HA03 (bas) avec interprétation sur forme de couches

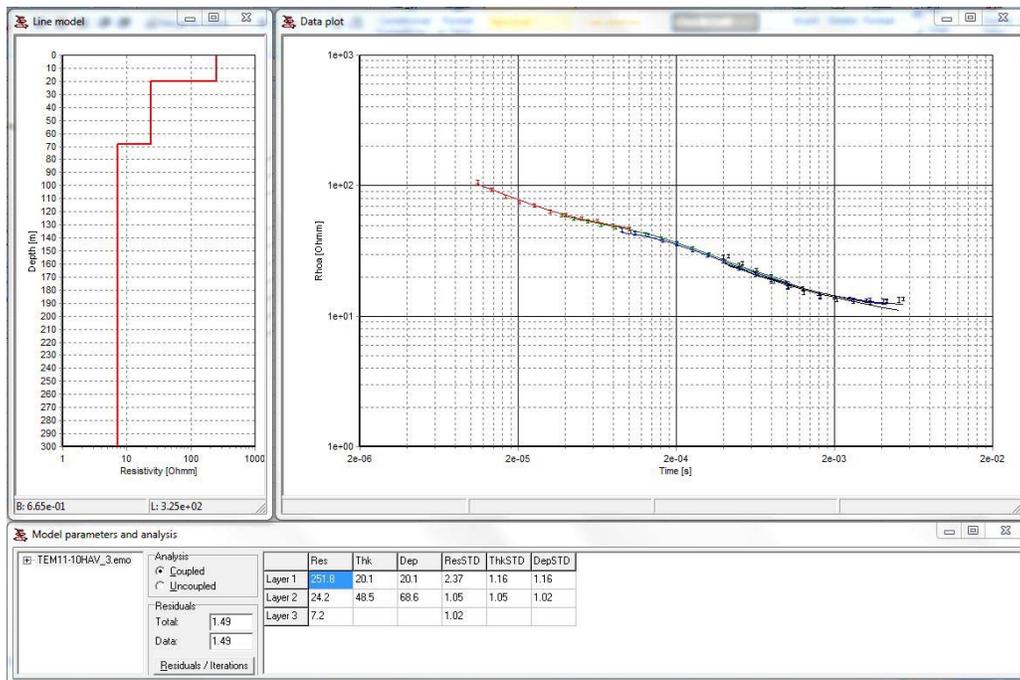


Figure 14 : Havre-Aubert : interprétation 1D (sous forme de couches) du sondage HA10. Noter la différence de comportement avec la station HA01. Ici une zone conductrice (7.2 $\Omega.m$) est détectée à une profondeur de ~ 69 m.

4.1.2 Secteur d'Étang-du-Nord

On trouvera au tableau 10 du paragraphe 6 l'essentiel des interprétations sur les sondages d'Étang-du-Nord. À l'est, la nappe salée s'enfonce du sud (bord de mer) vers le nord avec une curieuse remontée au nord. Par opposition, l'aquifère de la zone ouest de ce secteur, celle où ont été réalisés les nouveaux puits en 2009, paraît épaisse avec des profondeurs interprétées supérieures à 200 m. Le sondage ETAN17 (figure 15) est intéressant car un levé de diagraphie EM dans le puits voisin a été réalisé qui ne montre pas d'eau salée jusqu'à la profondeur de 90 m. L'interprétation du sondage EDN17 montre une profondeur interprétée à la nappe de 122 m, soit 30 m sous le fond du puits. La résistivité de cette zone salée est trouvée égale à 2.2 ohm.m.

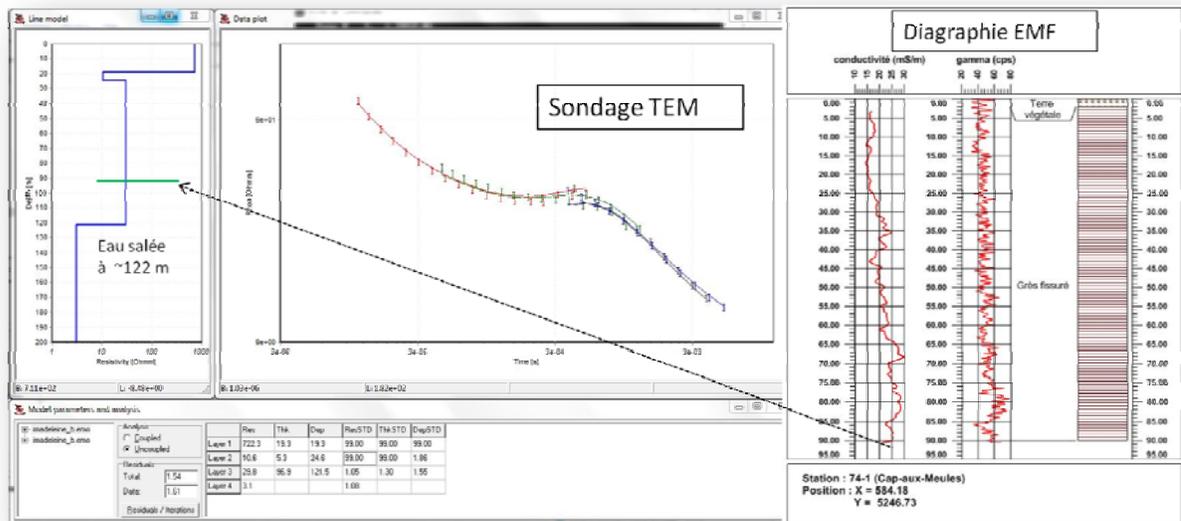


Figure 15 : sondage ETAN17 d'Étang-du-Nord : données et interprétation à l'aide du logiciel SITEM-SEMDI d'AG. À noter la relation entre la diagraphie en forage et l'interprétation TEM

4.1.3 Secteur de Fatima

On trouvera au tableau 9 un résumé des interprétations décrivant les profondeurs à la zone conductrice profonde et la résistivité interprétée associée. Le secteur de Fatima présente une grande variation des profondeurs à la zone conductrice. Tout d'abord dans la zone est, du nord (bord de mer) vers le sud la nappe salée s'enfonce rapidement puis semble remonter dans la région du puits P8. Ce dernier comportement est plutôt inattendu et on devrait vérifier s'il n'a pas une cause géologique ou si cela peut être l'effet d'une variation latérale de résistivité (effet 2D causé par des structures métalliques?). Les sondages autour de cette zone (FAT03, FAT07) n'ont pas d'enregistrement des composantes horizontales qui nous auraient permis de confirmer ou d'infirmer cette possibilité.

Dans la zone ouest, où se situent les quatre nouveaux puits forés en 2009, la nappe est profonde.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

À titre d'exemple on présente à la figure 16 le sondage FAT03 au-dessus de la zone conductrice peu profonde à l'est, à proximité du puits P8, et le sondage FAT12 de la zone ouest.

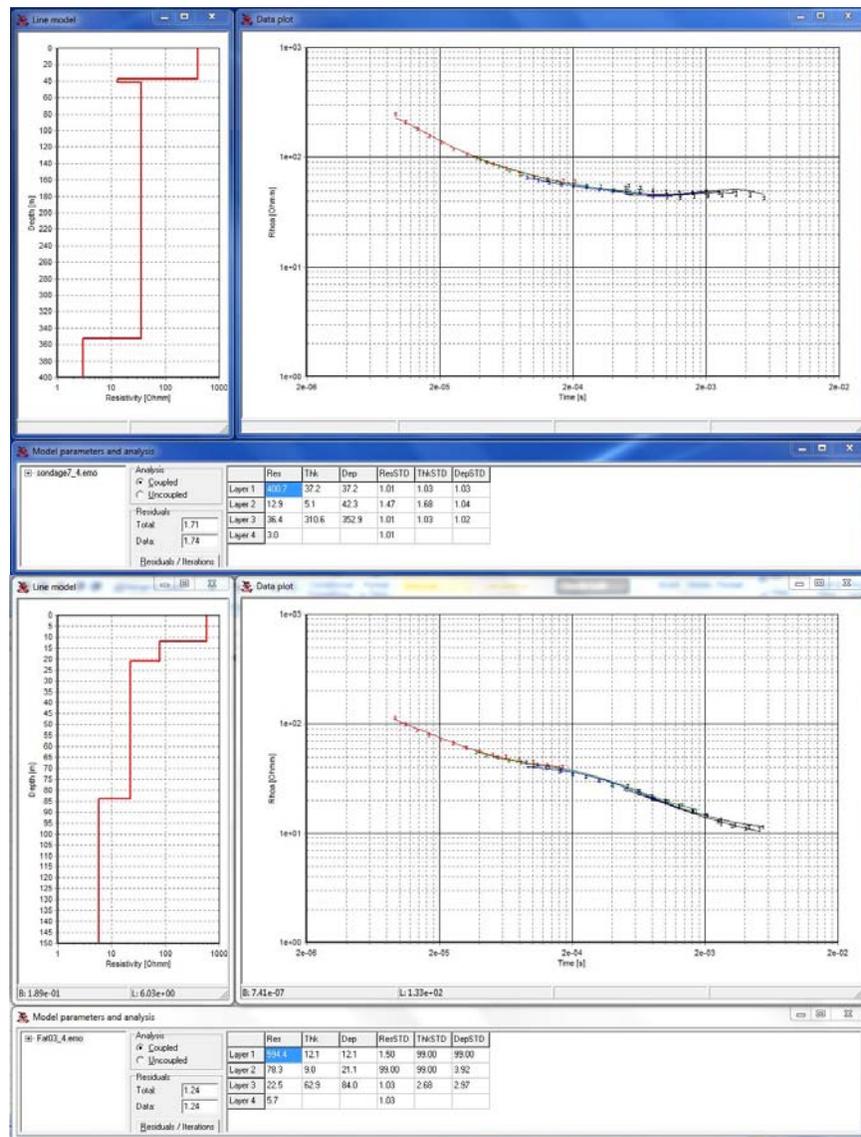


Figure 16 : Fatima : sondages FAT03 (bas) près du puits P8 à l'est, et FAT12 (haut) dans la partie ouest, près du puits FAT-09-03PP

4.1.4 Secteur de Havre-Aux-Maisons

Les sondages de Havre-Aux-Maisons sont présentés à l'annexe A2 avec leur interprétation. Le tableau 14 que l'on retrouve au paragraphe 6 résume les principaux résultats quant à la profondeur, l'élévation et la résistivité de la couche conductrice détectée. Le secteur est marqué par des différences importantes entre les sondages du sud et les autres au niveau de la profondeur à la couche conductrice. Ces différences sont mises en évidence à la figure 17 qui présente quelques sondages du secteur. On remarquera la pente plus prononcée de la courbe des résistivités apparentes aux temps longs pour les sondages du sud.

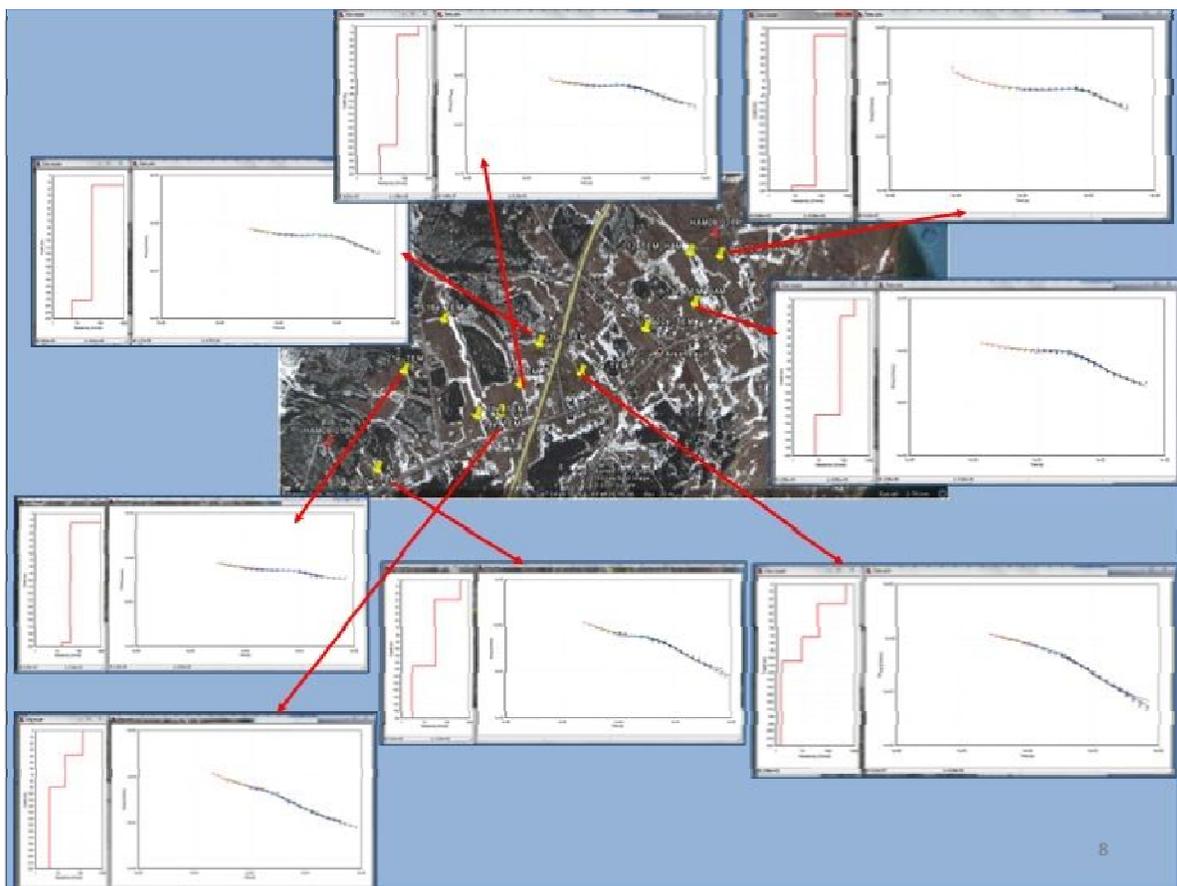
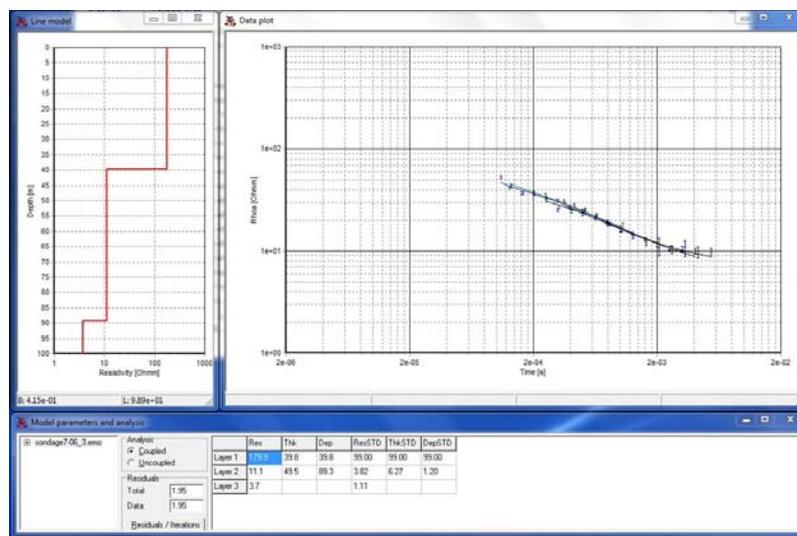


Figure 17 : Havre-Aux-Maisons : quelques sondages du secteur montrant la variation entre les sondages du sud et les autres. Les pentes aux temps longs sont plus prononcée et arrive plus tôt au sud.

4.1.5 Secteur de Grosse-Île

Il a été difficile de trouver des sites avec accès facile, ayant une surface suffisante pour installer la boucle émettrice, et qui soient dépourvus de clôtures. Faute d'accès permis par les propriétaires, il n'a pas été possible de faire des sondages sur la partie nord de Grosse-Île. De plus, le niveau de bruit observé sur les sondages de Grosse-Île est le plus important mesuré dans toutes les îles de l'archipel. Cela se traduit par des courbes de sondage avec un peu plus de dispersion (erreurs relatives sur les données plus importantes). L'origine du bruit est inconnue mais il s'agit d'interférences EM, possiblement générées par des moteurs, des pompes ou des émetteurs radio ou micro-ondes dans le voisinage.

Malgré cette source de parasites, les courbes de sondage sont exploitables. Pour cela nous avons utilisé des enregistrements beaucoup plus longs et la technique de la sommation cohérente (« signal stacking » en anglais). La figure 18 montre les deux sondages GI01 et GI03 avec leur interprétation. Tous les sondages peuvent être examinés à l'annexe 3. Un sommaire des éléments essentiels de l'interprétation est donné au tableau 16 (paragraphe 6).



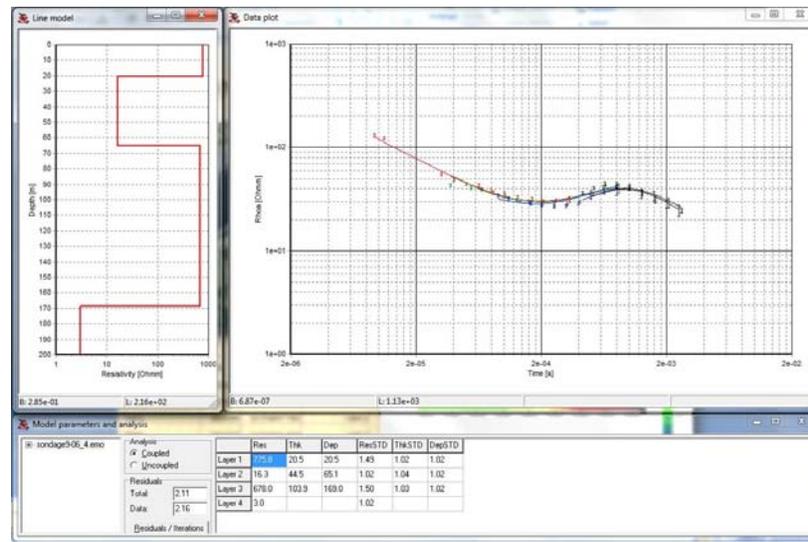


Figure 18: Grosse-Île : sondages GI01 (haut) et GI03 (bas). À noter : les données aux temps courts (entre 10 et 30 μ s) sont bruitées et elles ont été masquées lors de l'édition.

4.1.6 Secteur de Grande-Entrée

Vu l'étroitesse de l'île et le peu de disponibilité de terrains appropriés pour les sondages TEM au sud de la route 199, les mesures ont été réalisées sur des lots situés entre la côte au nord et la route. Le site GE04 situé sur le terrain devant la maison du propriétaire semble affecté par des effets latéraux (2D). Néanmoins, malgré la proximité des maisons, les sondages sont de bonne qualité, la dispersion étant faible. À titre d'exemple, on montre à la figure 19 les sondages GE01 et GE05. Le résultat des interprétations est résumé au tableau 17 (paragraphe 6).

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

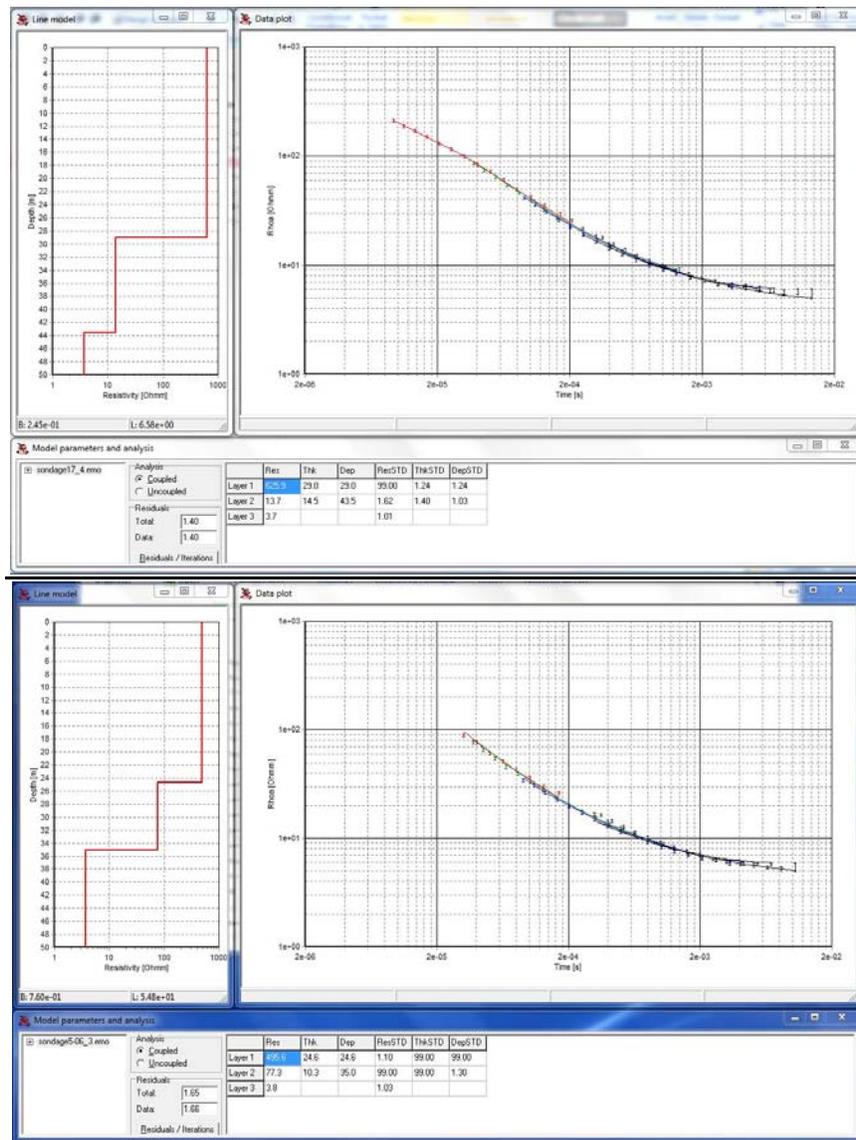


Figure 19: Grande-Entrée : sondages GE01 (haut) et GE05 (bas) avec interprétation en terrain à 3 couches. La nappe salée (3.7 Ω .m) est détectée entre 35 et 43 m de profondeur.

4.2 Diagraphies de conductivités EM :

Les diagraphies de conductivité EM ont été réalisées jusqu'à des profondeurs auxquelles la sonde n'était plus capable de descendre. Cet arrêt, lorsqu'il arrive avant la fin du forage, est causé par des éboulements ou des déformations du trou qui réduise la taille du forage à un diamètre inférieur à celui de la sonde. Ainsi la majorité des levés se sont arrêtés avant la fin prévisible du forage tel que décrits par les descriptions géologiques des forages. On trouvera au tableau 1 pour chaque forage étudié la profondeur anticipée et la profondeur à laquelle la diagraphie de conductivité EM a dû être interrompue. Le forage 13007031 de Fatima est à ce titre le pire puisque le levé a dû être interrompu à la profondeur de 23.4 m alors que le forage a une profondeur anticipée de 73.0 m. Le puits 13007042, dit Chevarie, de l'Île de Havre-Aux-Maisons n'a pu faire l'objet d'un levé de diagraphie car inaccessible et, de toute manière, tubé avec un tubage métallique sur toute sa longueur. On a remplacé ce forage par celui découvert à Havre-Aubert, le Hav002, à proximité des stations TEM HA01 et HA04.

Tableau 2 : profondeurs des diagraphies de conductivité EM dans les puits anciens d'exploration

Numéro du forage	Profondeur initiale (m)	Profondeur de diagraphie (m)
Vigneau 13007011	73 m (240')	73.0
Hav002	inconnue	67.0
Fatima 13007031	73 m (240')	23.4
Cap-Aux-Meules 13007086	91.0	90.85

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Les diagraphies de conductivité EM pour les anciens puits sont présentées aux figures 20, 21, 22 et 23.

Tous les forages ont fait l'objet de mesures de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel à la descente et à la montée. Les deux ensembles de données ont été comparés pour détecter d'éventuelles erreurs. La coïncidence parfaite des diagraphies à la descente et à la montée démontre la grande reproductibilité des mesures et nous assure d'un grand degré de confiance dans les résultats.

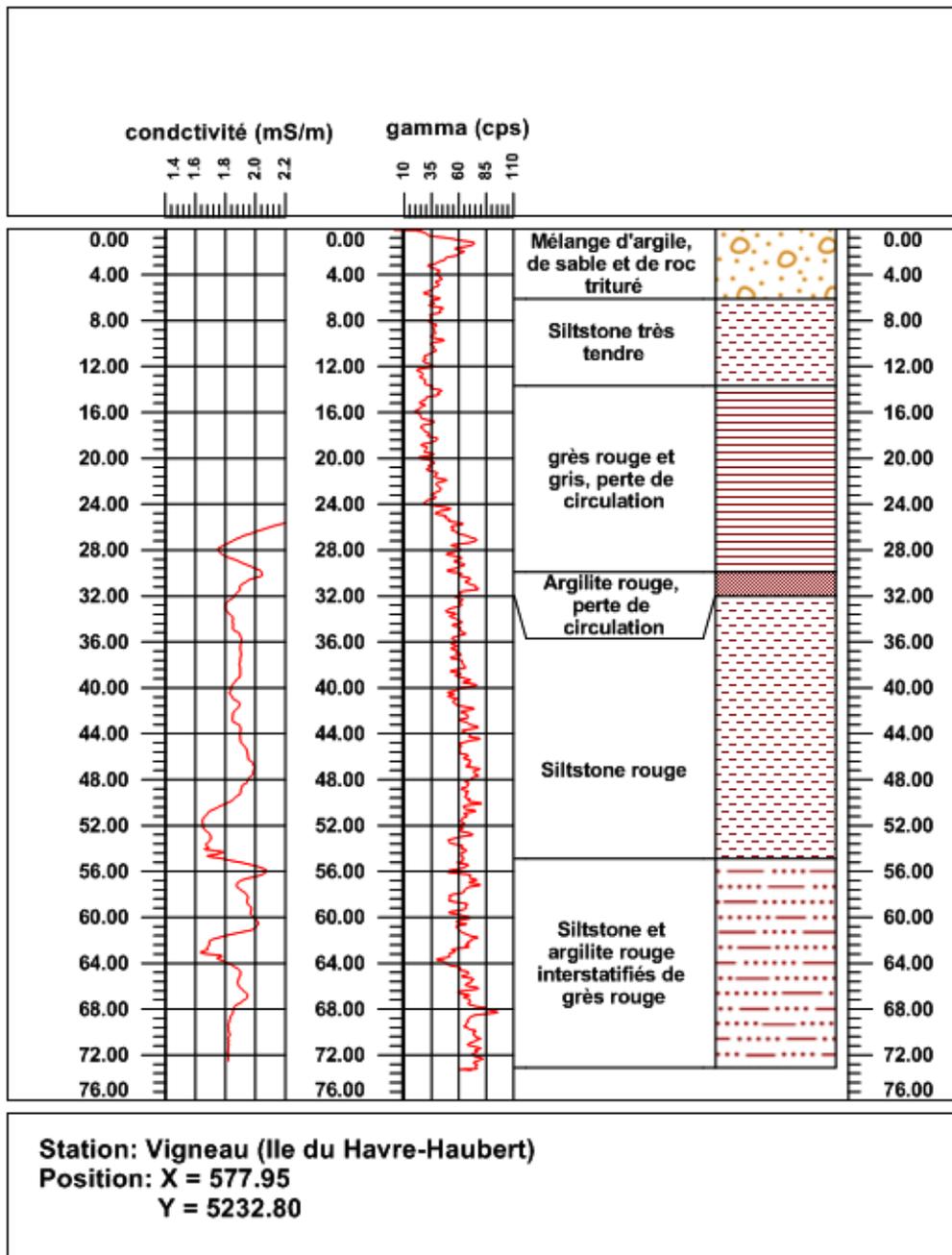


Figure 20 : Puits Vigneau (Havre-Aubert). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.

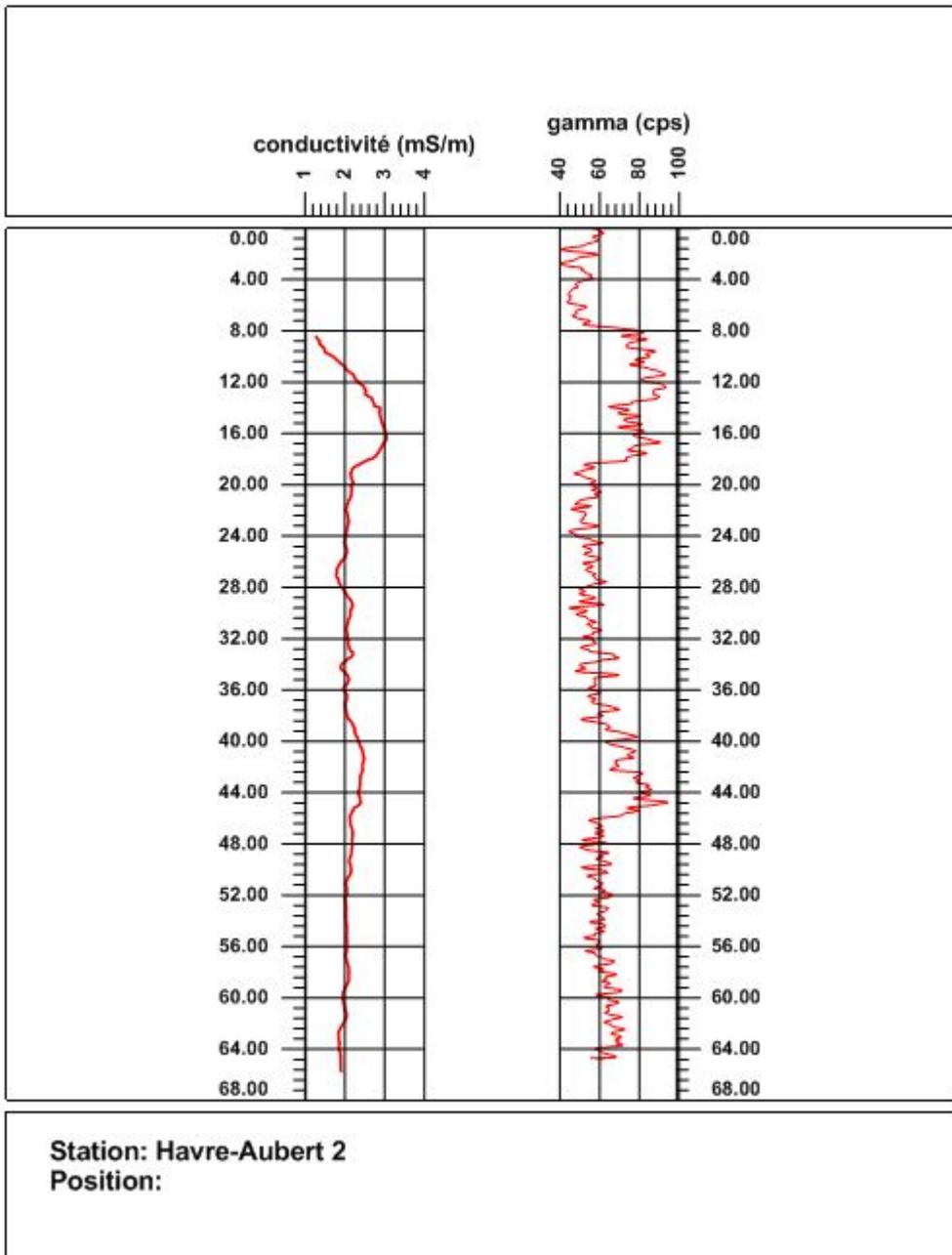


Figure 21 : Hav002 (Havre-Aubert). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel. La stratigraphie du site n'est pas disponible pour ce forage.

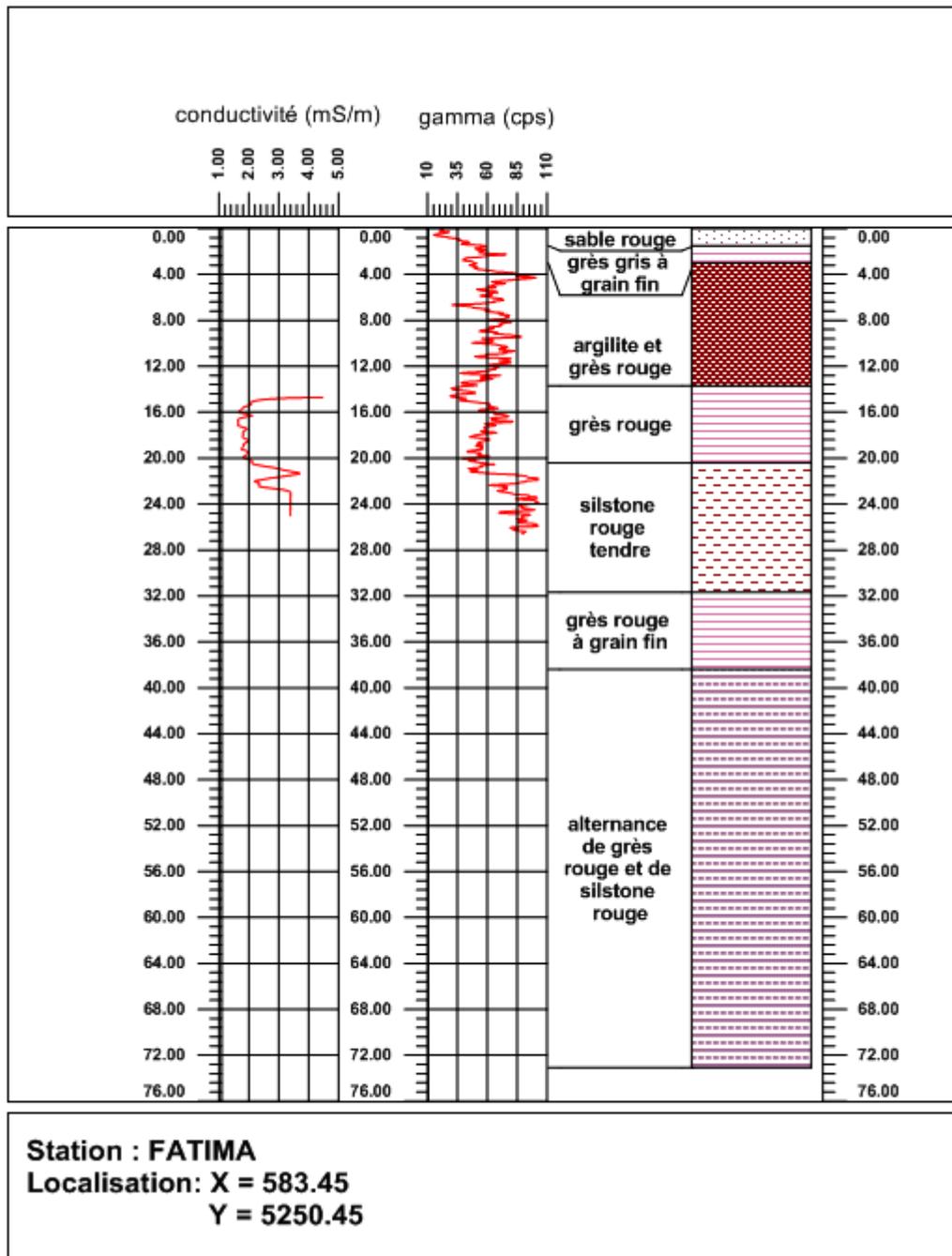


Figure 22 : 13007031 (Fatima). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.

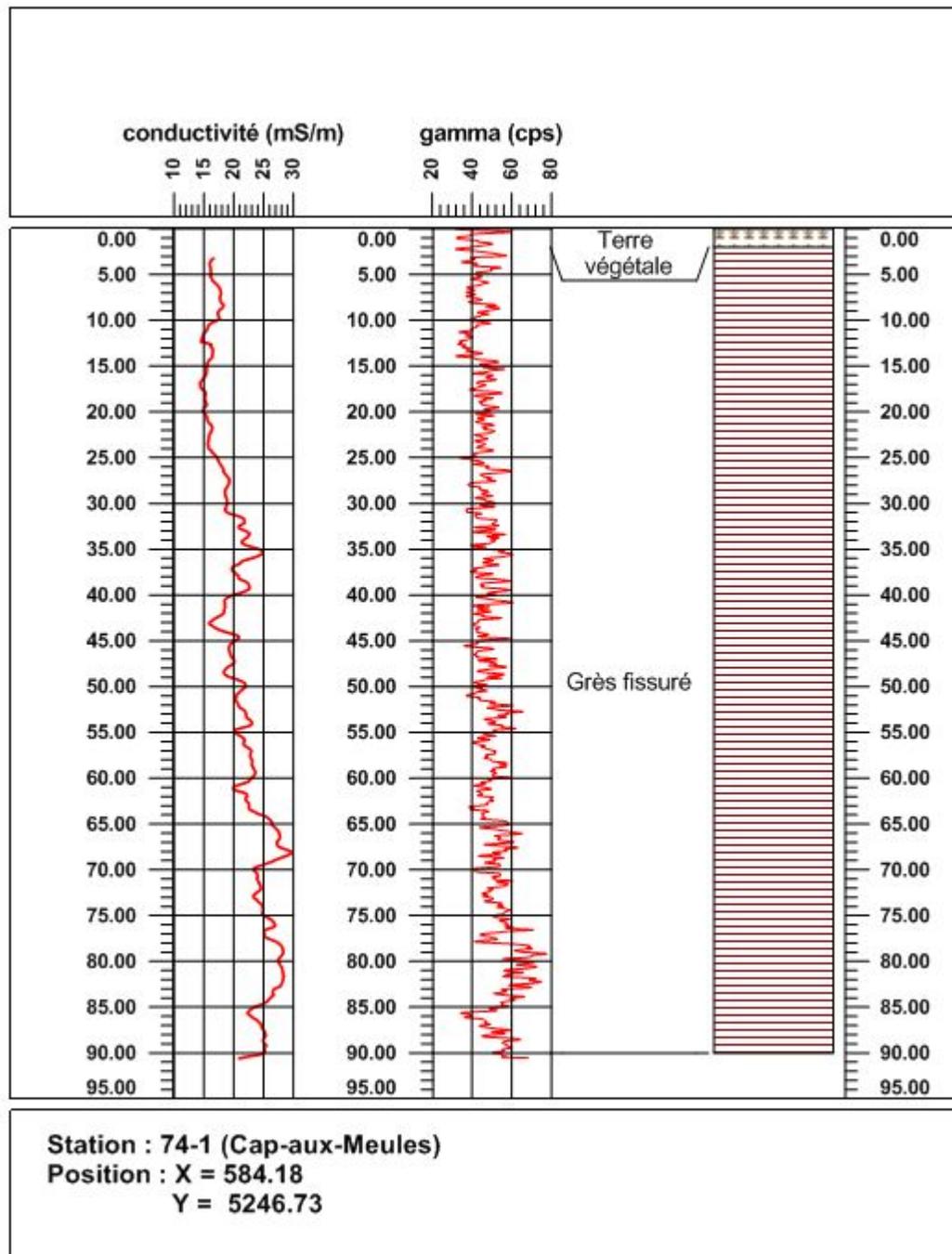


Figure 23 : 13007086 (Cap-Aux-Meules). Diagraphies de conductivité EM et de rayonnement gamma naturel comparées à la stratigraphie connue du site.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Puits Vigneau : jusqu'à 25 m de profondeur le puits est chemisé d'acier et donc la conductivité EM est saturée. À partir de 25 m de profondeur, la conductivité oscille entre 1.6 et 2.1 mS/m (milliSiemens/m). La corrélation entre la conductivité, le gamma naturel et la stratigraphie n'est pas remarquable. Le faible compte gamma entre 0 et 25 m peut être provoqué par l'atténuation des rayonnements gamma dans le tubage métallique du puits. La conductivité de 1.6 à 2.1 mS/m correspond à une résistivité de 475 à 625 $\Omega \cdot m$ pour les formations autour du puits. Cette haute résistivité suppose une eau saturant les pores à 60 à 80 $\Omega \cdot m$ pour des grès présentant une porosité présumée de 25% suivant la formule d'Archie. Ces résistivités de l'eau dénotent une excellente qualité équivalente à 100-150 mg/l de solides dissous pour une eau à $T=10^{\circ}C$, suivant la formule (8).

$$\sigma_w = 1.6 \times 10^{-4} TDS \left(1 + \frac{(T - 25)}{50} \right) \quad [S/m]$$

(8)

Hav02 : le tubage métallique est moins long dans ce forage (8 m) et après cette profondeur la conductivité varie entre 2 et 3 mS/m. On note cette fois une bonne corrélation entre l'augmentation locale de conductivité et celle du rayonnement gamma (8-18 m et 38-46 m) indiquant certainement un accroissement de la teneur en argile. Malheureusement, nous n'avons pas pu mettre la main sur des documents donnant la stratigraphie du site. Les conductivités légèrement plus élevées que celles du puits Vigneau démontrent toutefois une très bonne qualité de l'eau souterraine.

Fatima 13007031: le tubage en acier possède une longueur d'environ 14 m. Les diagraphies n'ont pu être réalisées que jusqu'à 23.4 m, profondeur à laquelle la sonde se bloquait. Sur cette courte distance, la conductivité est faible, de l'ordre de 2 mS/m à

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

l'exception de la position 21.5 m où une valeur de 3.6 mS/m est mesurée. La partie accessible du forage est trop courte pour en tirer des informations utiles.

Cap-Aux-Meules 13007086: le tubage a une longueur de 4 m. La conductivité EM montre des variations de 15 mS/m à 30 mS/m. Sur l'intervalle 4-25 m elle oscille autour de 15-18 mS/m; puis elle monte régulièrement pour atteindre 25 mS/m à la profondeur de 35 m. Après une baisse progressive (bas de 15 mS/m à 43 m), elle augmente pour atteindre 30 mS/m à la profondeur de 68 m et demeure entre 24 et 20 mS/m pour le reste du levé. On note une corrélation entre les zones de conductivité élevée et les zones de rayonnement gamma élevé entre 65 m et 90 m de profondeur. Cela pourrait être attribuable à la présence d'argile. Comme le puits est dans un grès fissuré, sa porosité effective doit être grande. Si on assume 30% de porosité, on détermine une conductivité de l'eau de 90-180 mS/m; ces valeurs correspondent à une salinité de 800 à 1600 mg/l à $T=10^{\circ}\text{C}$, correspondant à une eau entre fraîche et saumâtre (voir tableau 3).

Tous les nouveaux puits forés en 2009 ont fait l'objet de diagraphies EM et gamma naturel. Les résultats de ces diagraphies peuvent tous être examinés à l'annexe 3. De manière générale, la conductivité des formations ne varie pas beaucoup, oscillant entre 10 et 30 mS/m (30 à 100 $\Omega\cdot\text{m}$) avec la valeur la plus probable à 22 mS/m soit 45 $\Omega\cdot\text{m}$. Si on suppose que les formations de grès rouge présentent des porosités de 25-30%, cela correspond à une eau interstitielle de 8-10 $\Omega\cdot\text{m}$, donc de bonne qualité. Les informations obtenues des diagraphies EM ont permis de contraindre l'inversion 1D des sondages TEM réalisés dans le voisinage de ces puits. La résistivité moyenne obtenue pour chaque puits entre la fin du tubage et le fonds du trou, typiquement entre 20 et 50 m, a permis de fixer ces paramètres lors de l'inversion 1D des sondages TEM. Cette contrainte a permis de réduire de manière significative l'ambiguïté de l'interprétation (voir discussion à l'annexe 4 sur la modélisation et inversion des sondages pour la zone de mélange).

4.3 Mesures sur carottes de forage

Les mesures des propriétés électriques des grès saturés avec des solutions de salinité variée devraient permettre d'interpréter les modèles de résistivité obtenus en termes de concentration en sel. Afin de déterminer les propriétés électriques des grès sous diverses conditions de saturation en eau de qualité variable, nous avons sélectionné douze (12) échantillons de carotte d'un forage pétrolier à l'entrepôt du MRNF à Québec. Ce forage, le G-003, réalisé pour le compte de Corridor Resources en 1999 au Nord-Ouest de Fatima (Lat. $47^{\circ}25'31.57''$; Long. $61^{\circ}52'00.43''$), a intersecté presque exclusivement des grès rouges présentant une porosité variant entre 15 et 25%. (Corridor Resources, 2000). Les échantillons, longs de 12 et 18 cm, ont un diamètre de 8.4 cm (figure 24). Comme les carottes ne présentaient pas d'extrémités planes, nous avons fait scier les échantillons afin qu'ils présentent des bases planes et perpendiculaires à l'axe de la carotte, ultérieurement lissées à l'aide d'une surfaceuse. La proposition originale était de saturer ces divers échantillons avec des solutions de plus en plus salines pour couvrir la gamme depuis l'eau douce jusqu'à celle de l'eau de mer (tableau 3). Un porte-échantillon a été développé et un montage expérimental a été mis en place (figure 25). Nous avons commencé par faire circuler dans le montage une eau déionisée présentant une résistivité de $1800 \Omega.m$. Lorsque nous avons voulu prendre les mesures sur l'échantillon après 2 jours de saturation la solution était descendue à $30 \Omega.m$ indiquant que la carotte avait libéré du sel contenu dans ses pores. L'échantillon lui-même présentait une résistivité de $5 \Omega.m$ environ. Des essais répétés en faisant circuler de l'eau déionisée n'ont pas permis de lessiver le sel contenu dans la carotte. D'autres échantillons ont été testés mais tous présentaient le même comportement.

Afin de permettre l'élimination du sel dans les pores, les carottes ont été immergées dans un bassin contenant de l'eau déionisée. Régulièrement, nous vérifions la conductivité de l'eau du bassin pour suivre le processus de désalinisation et nous remplaçons l'eau ainsi

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

chargée par de l'eau déionisée. Le processus de désalinisation des échantillons est long car il procède par diffusion. Lorsque l'eau du bassin nouvellement ajoutée ne changera plus après quelques jours, on pourra alors être certain que les échantillons sont prêts à faire l'objet de l'étude originalement prévue. Cette période s'étend au delà de la date de tombée de ce rapport. Dès que les mesures auront été réalisées, nous les transmettrons au représentant du MDDEP.

On mentionne, dans le rapport final du Groupe Madelin' Eau (2004), 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. Dans leur rapport « Essais de caractérisation des grès rouges de Cap aux Meules » (1996), Gélinas et Choquette rapportent des valeurs de porosité dans l'intervalle 28-33% pour les grès rouges du membre de l'Étang-des-Caps de la Formation du Cap aux Meules.



Figure 24 : carottes de grès rouge (porosité de 15-25%) du forage pétrolier G-003 provenant de diverses profondeurs, sciées et surfacées. La profondeur (en pieds) est indiquée au feutre bleu sur la surface latérale des carottes.

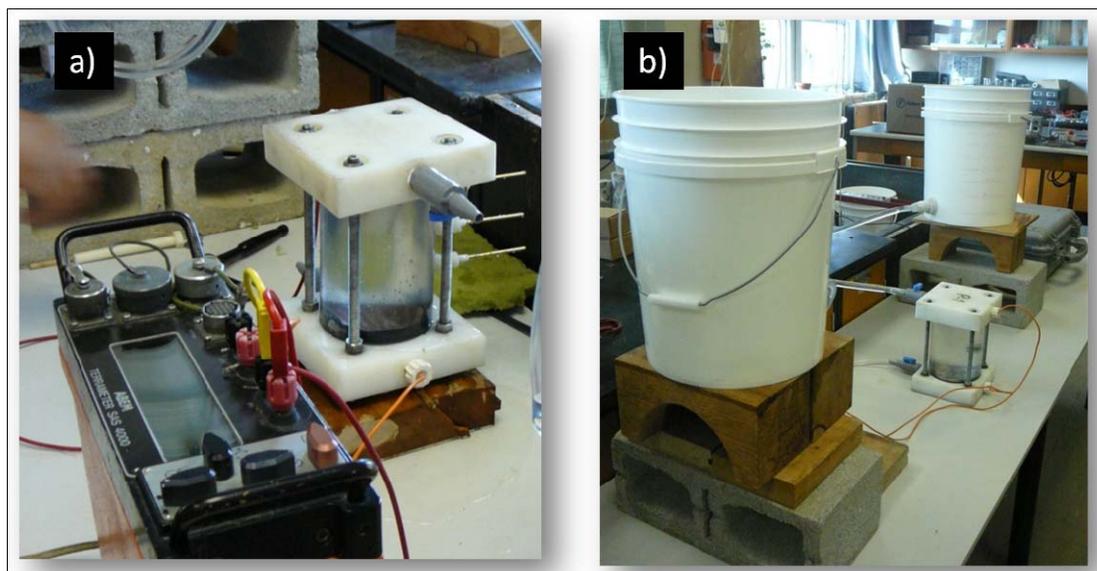


Figure 25 : a) porte-échantillon permettant d'introduire une carotte de grès, de la saturer avec une solution de concentration choisie et de faire les mesures de résistivité électrique; b) vue du montage incluant un réservoir amont, le porte-échantillon et un réservoir aval.

Tableau 3 : salinité de l'eau et qualité

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+

4.4 Mesures de conductivité électrique de l'eau dans les puits.

Les mesures de la conductivité électrique de l'eau dans les puits ont été obtenues de la base des données de la Municipalité avec l'aide de la technicienne Annick Petitpas. Des sondes sont installées en permanence dans certains puits en exploitation ou en attente de certification. Seule une partie des puits instrumentés fournissent la conductivité électrique alors que tous donnent la température et le niveau de l'eau.

Nous avons obtenu les données des relevés de juin et d'août 2011. Les données consistent en des données de conductivité à une profondeur (celle où la sonde est installée dans les puits ~ 30 m) en fonction du temps. Les mesures montrent que la conductivité ne varie que très peu en fonction du temps. On a donc retenu la valeur moyenne; elle est donnée ainsi que la température moyenne au tableau 4 pour les puits ayant une sonde mesurant la conductivité électrique.

Tableau 4 : conductivités et températures moyennes dans les puits

Site	Puits	cond. eau (mS/m)	T (°C)
Fatima	FAT-09-04-PP	14.9	6.4
Fatima	FAT-09-03-PP	19.9	5.1
Fatima	FAT-09-03-B	5.9	6.4
Fatima	FAT-09-02-PP	20.8	5.9
Fatima	FAT-09-01-PP	16.4	7.0
Étang-du-Nord	EDN-09-04-PP	6.0	6.5
Étang-du-Nord	EDN-09-03-PP	11.6	6.8
Étang-du-Nord	EDN-09-02-PP	12.0	4.6
Étang-du-Nord	EDN-09-01-PP	46.1	6.5
Étang-du-Nord	EDN-09-01-PP	45.1	6.5
Havre-Aux-Maisons	HAM-P4	23.8	5.9
Havre-Aux-Maisons	HAM-1044468	23.6	5.9
Havre-Aux-Maisons	HAM-1036421ERE	17.5	6.4
Havre-Aux-Maisons	HAM-09-02-PP-ERE	17.2	6.4
Havre-Aux-Maisons	HAM-09-01-PP	23.3	5.8

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Les conductivités électriques mesurées ne semblent pas être en accord avec les données des diagraphies EM. En effet, aux mêmes positions approximatives des sondes de conductivité et à température égale de l'eau des puits, les conductivités calculées des formations de grès et les conductivités mesurées par diagraphie EM ne concordent pas. Pour obtenir les conductivités des formations à partir de la mesure des conductivités de l'eau on a utilisé la formule d'Archie (voir eq. 3) avec une porosité des grès comprise entre 25 et 30% et l'exposant de cimentation m variant entre 1.6 et 2.0. Le tableau 5 permet de comparer les valeurs prédites et mesurées. La colonne des conductivités calculées indique les estimés extrêmes (min-max).

Tableau 5 : comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la conductivité des formations de grès.

Puits	σ eau (mS/m)	σ formation calculée (mS/m)	σ formation observée (mS/m)
FAT-09-04-PP	14.9	1.3-2.2	19.5
FAT-09-03-PP	19.9	1.8-2.9	21.9
FAT-09-02-PP	20.8	1.9-3.0	14.5
FAT-09-01-PP	16.4	1.5-2.4	12.8
EDN-09-04-PP	6.0	0.5-0.9	17.3
EDN-09-03-PP	11.6	1.0-1.7	19.3
EDN-09-02-PP	12.0	1.1-1.7	17.3
EDN-09-01-PP	46.1	4.1-6.7	22.5
HAM-09-02-PP-ERE	17.2	1.5-2.5	18.1
HAM-09-01-PP	23.3	2.1-3.4	23.0

5. ÉTUDE SUR LA SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE TEM

Sous ce titre de paragraphe une étude est réalisée couvrant tous les aspects de l'interprétation qui pourraient avoir un impact sur la détermination de la profondeur de l'interface eau douce/eau salée. Ces aspects sont liés à la résolution des paramètres (résistivités et épaisseurs des couches) en fonction des erreurs sur les données, du nombre de couches utilisé dans l'inversion, de la reproductibilité des mesures et des résultats, et sur la possibilité de séparer la zone de mélange de la zone d'eau douce et de la zone d'eau salée. Cette étude permettra d'établir le niveau de confiance sur l'interprétation et, plus particulièrement, sur la profondeur à l'interface ED-ES.

5.1 Étude sur la résolution des paramètres du modèle de couches

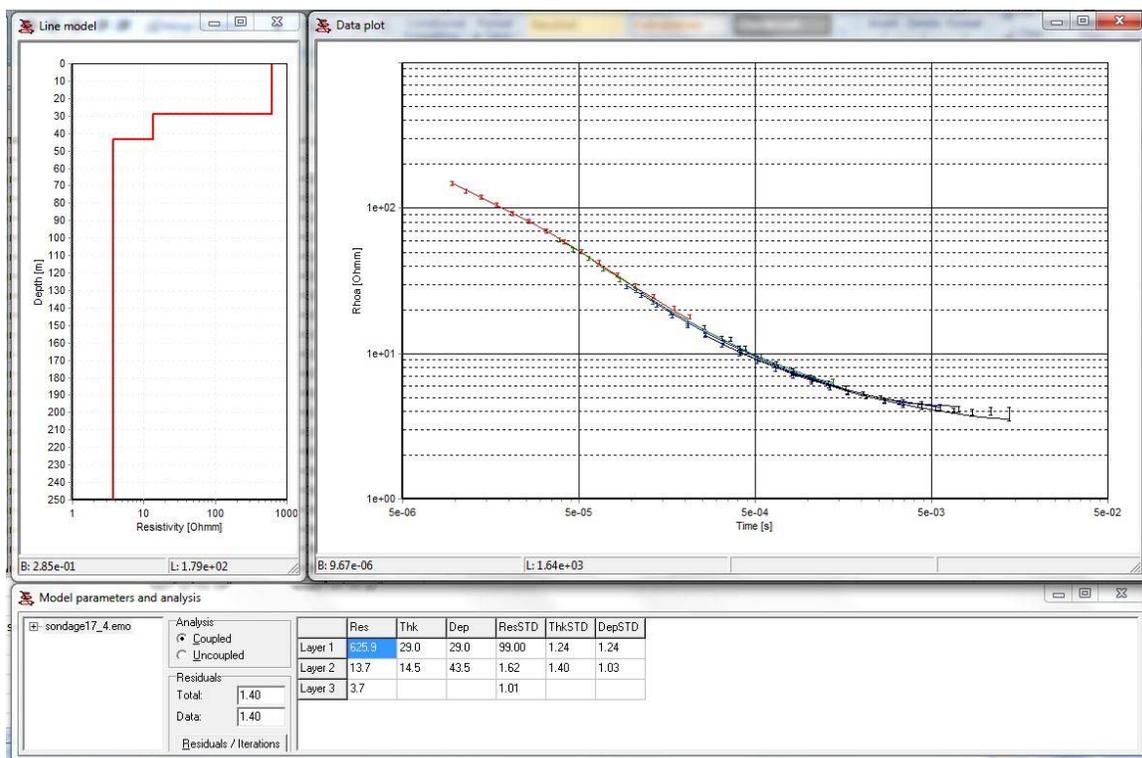


Figure 26 : sondage TEM GE01 : la courbe du diagramme en haut à droite représente la courbe de résistivité apparente en fonction du temps; la courbe de gauche, le profil de résistivité des couches en fonction de la profondeur; finalement, dans la partie du bas, le

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

tableau indique les paramètres déterminés pour chaque couche du modèle ainsi que les erreurs.

Pour chaque sondage TEM, les données mesurées en fonction du temps (axe horizontal) montrent une dispersion plus ou moins importante. Ce sont les barres d'erreur que l'on aperçoit sur les graphiques de la résistivité apparente en fonction du temps. Plus la dispersion est grande, moins les paramètres du modèle seront bien déterminés. Autrement dit, des erreurs sur les données engendrent une incertitude sur les paramètres du modèle de couches. Le programme d'inversion SITEM-SEMDI permet pour chaque inversion obtenue de déterminer l'incertitude sur les résistivités, les épaisseurs et les profondeurs des couches. Par exemple, sur le sondage GE01 réalisé à Grande-Entrée (figure 26), le tableau du bas présente les paramètres déterminés par l'inversion pour chacune des 3 couches du modèle ainsi que les incertitudes associées. L'incertitude est exprimée par une valeur (par exemple 1.03) par laquelle on peut diviser le paramètre estimé et le multiplier. Les deux valeurs obtenues sont les valeurs minimum et maximum du paramètre. Par exemple, la profondeur à la 3^{ème} couche est de 43.5 m et le coefficient d'incertitude est de 1.03. L'intervalle d'incertitude sur cette profondeur p est de $43.5/1.03 < p < 43.5 * 1.03$ soit $42.2 \text{ m} < p < 44.8 \text{ m}$. On peut tout aussi bien dire que la profondeur est connue à $\pm 3\%$. Dans ce sondage, en regardant le tableau, on peut dire que la résistivité de la 3^{ème} couche est bien déterminée ($\text{ResSTD} = 1.01$); elle est égale à $3.7 \text{ ohm.m} \pm 1\%$. Par contre, la résistivité de la 1^{ère} couche (Res) non saturée est très mal déterminée ($\text{ResSTD}=99.0$).

De manière générale, pour tous les sondages des Îles-de-la-Madeleine la résistivité de la dernière couche (couche conductrice) ainsi que sa profondeur sont bien déterminées. On pourra retrouver à l'annexe 2 tous les sondages TEM avec leur interprétation et les incertitudes sur les paramètres du modèle en couches.

5.2 Sensibilité de l'interprétation au nombre de couches choisi

D'après la géologie connue des îles ainsi qu'à partir des levés de tomographie de résistivité électrique réalisés en 2003-2004 par Madelin'Eau et en 2009-2010 par les auteurs de la présente étude, on sait que le modèle électrique est constitué d'au minimum 3 couches : une couche superficielle de sol non-saturé, résistive (entre 200 et 600 ohm.m), d'une couche intermédiaire de grès rouge saturée en eau douce, l'aquifère des îles (résistivité de l'ordre de 50 ohm.m) et finalement d'un milieu semi-infini de grès rouge saturé en eau saline (résistivité entre 2 et 4 ohm.m). Il pourrait y avoir entre la couche saturée en eau douce et celle en eau salée, une zone intermédiaire : la zone de mélange (eau saumâtre). Par conséquent, si le nombre minimum de couches est de trois, un modèle à 4 ou 5 couches pourrait être justifiable. La question qu'on peut se poser alors est : est-ce que le nombre de couches du modèle assumé peut faire varier l'estimation des paramètres importants à déterminer, à savoir : la profondeur et la résistivité de la zone d'eau salée? Pour étudier la sensibilité de la méthode à déterminer la profondeur et la résistivité de la couche de grès saturée en eau salée en fonction du nombre de couches du modèle, les sondages ont systématiquement été interprétés par inversion 1D en considérant de 2, 3, 4 et 5 couches. Pour les besoins du document, on prendra le cas typique, le sondage GE05 de Grande-Entrée (figure 27). Les modèles à 3 et 4 couches sont ceux qui donnent le meilleur ajustement avec le moins de couches possibles.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

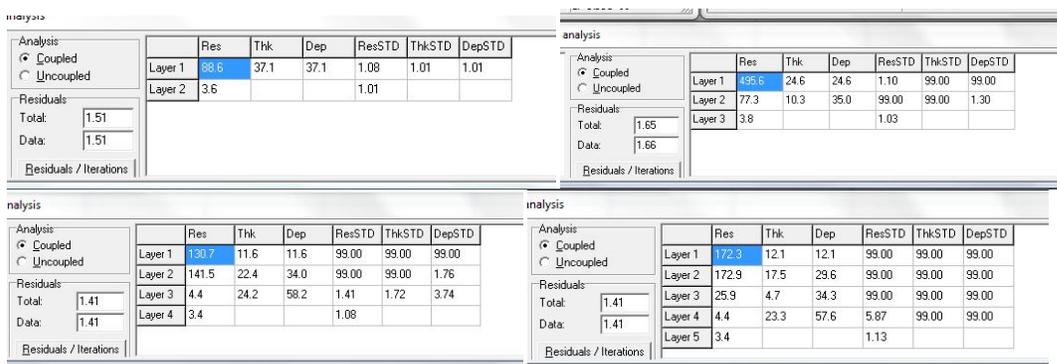
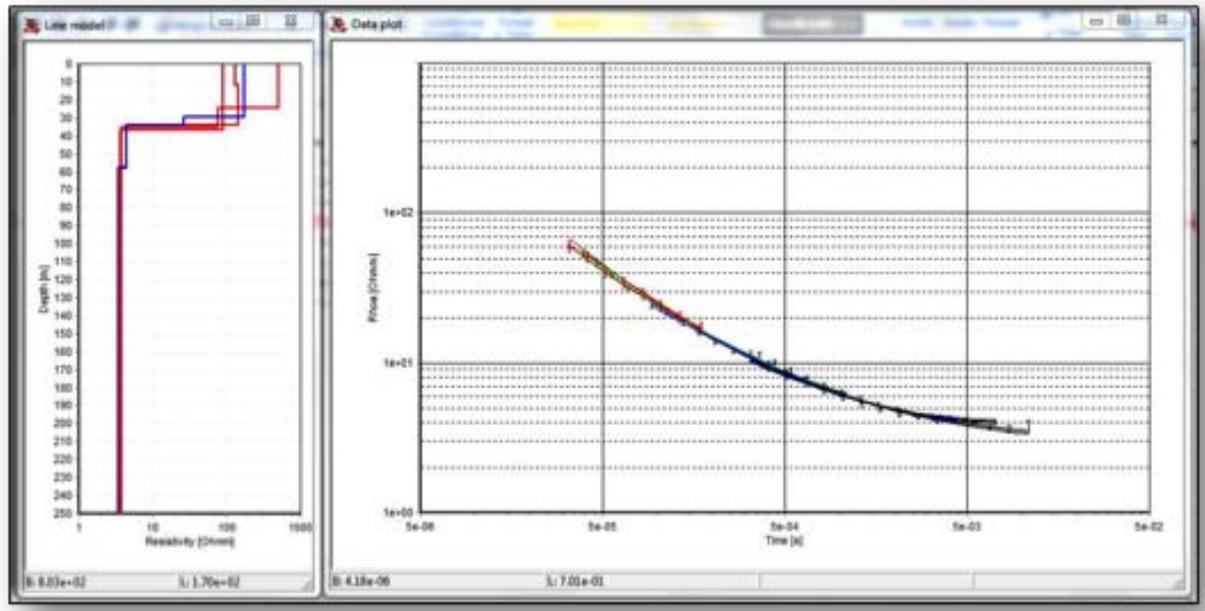


Figure 27 : GE05 (Grande-Entrée) : résistivités apparentes observées et interprétation sous forme de modèles à 2, 3, 4 et 5 couches. Si les zones supérieures (aquifère d'eau douce) sont plus ou moins bien déterminées, la profondeur à la zone de 3-4 ohm.m (eau salée) est bien déterminée (34-37 m).

5.3 Reproductibilité des mesures et des interprétations

Comme on veut pouvoir attribuer des variations de résistivité apparente observée à la variation de la profondeur de la nappe saline, il faut s'assurer que les données TEM sont reproductibles à l'intérieur de l'incertitude (bruit) des mesures si on répète les enregistrements à l'intérieur d'un lapse de temps sur lequel les variations possibles de la

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

nappe saline sont négligeables. Autrement dit, si pendant cet intervalle de temps tout est resté fixe, des sondages faits avec les mêmes paramètres d'acquisition au même endroit devraient être identiques. Nous avons répété ainsi entre mai et juin 2010, une station à Étang-du-Nord et deux autres entre mai et juin 2011. À titre d'exemple, nous présentons le cas de la station EDN02 d'Étang-du-Nord. La figure 28 montre les données de résistivité apparente des deux sondages ainsi que leur interprétation respective sous forme d'un modèle à 3 couches. On constate que les courbes des données sont quasiment superposées et que leur interprétation donne la nappe saline à 42.6 et 44.7 m avec une résistivité du niveau de grès rouge salé à 2.9 et 2.8 ohm.m respectivement. Le très léger écart entre les deux ensembles de données peut être causé par un positionnement non exact de la station. En effet, les sondages ont été placés dans les deux cas à l'aide d'un GPS dont la résolution n'est pas meilleure que ~ 10 m en x et y. Ce décalage en position peut créer cet écart mineur dans les données, surtout que cette station se situe près du rivage et que la nappe saline s'enfonce alors assez rapidement vers le centre de l'île. Il sera donc impératif, pour effectuer un suivi de la nappe à l'aide de sondages TEM répétés, de positionner avec une très grande précision les centres des stations ainsi que les positions des 4 coins du carré formé par la boucle d'émission. Typiquement ceux-ci seront positionnés au GPS différentiel avec une précision de l'ordre de 5 cm.

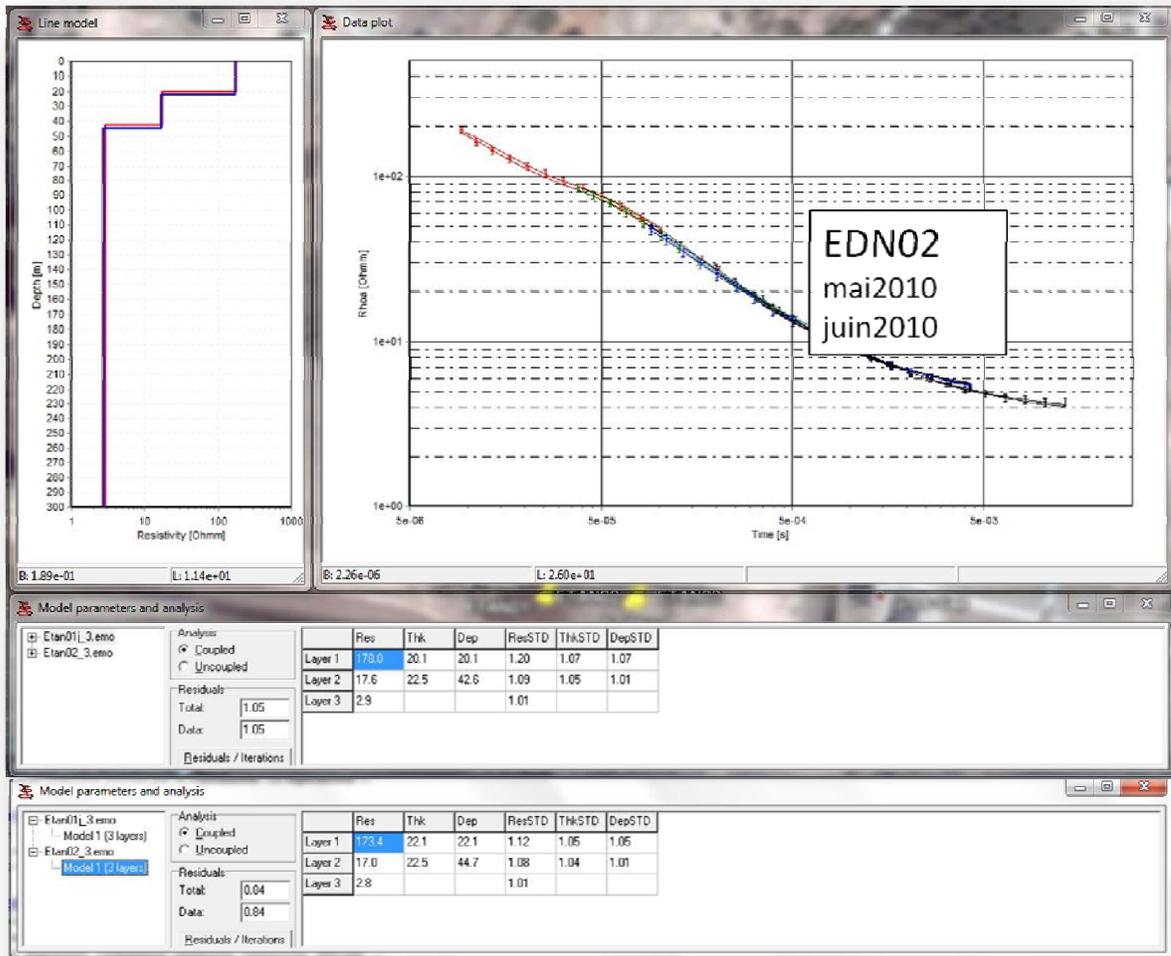


Figure 28: reproductibilité des sondages: sondage EDN02 (Étang-du-Nord). Le sondage EDN02 a été enregistré à deux occasions (mai et juin 2010) avec le même équipement et les mêmes paramètres d'acquisition. Les données se superposent presque parfaitement et l'interprétation est presque identique. Un très léger écart peut s'expliquer par une différence de positionnement de la station d'au maximum 20 m.

5.4 Résolution de la zone de mélange

Précédemment au paragraphe 5.2 (Sensibilité de l'interprétation au nombre de couches choisi), on a abordé la possibilité que le modèle incluse une zone intermédiaire, dite de « mélange », qui correspond à une eau saumâtre faisant la transition entre l'eau douce et l'eau salée. Une étude a été entreprise pour vérifier si cette zone de mélange peut être identifiée pour les modèles de résistivité électrique typiques des îles-de-la-Madeleine, un

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

type Grande-Entrée (profondeur à l'eau salée de 40 m) et l'autre type Étang-du-Nord (profondeurs de 100 et 130 m). Les réponses TEM à des modèles à 4 couches présentant une épaisseur variable de la zone de mélange (tableaux 6 et 7) ont été calculées, puis interprétées par inversion 1D. Deux approches ont été utilisées : avec erreur constante et avec bruit constant. La première suppose que les données de résistivité en fonction du temps présentent une erreur relative constante de 5%. La seconde suppose que le niveau de bruit est en absolu constant en fonction du temps, ce qui pour nos modèles des îles cause des erreurs relatives plus grandes aux temps longs.

Tableau 6 : paramètres du modèle de résistivité 4 couches incluant la zone de mélange (modèle Étang-du-Nord)

Couche #	Résistivité (ohm.m)	Épaisseur (m) cas prof=100	Profondeur (m)	Épaisseur (m) cas prof=130	Profondeur (m)
1	400	5	0	5/10	0
2	50	94/90/85/65	5	115/90	5/10
3	10	1/5/10/30	99/95/90/70	10/30	120/100
4	3		100		130

Tableau 7 : paramètres du modèle de résistivité 4 couches incluant la zone de mélange (modèle Grande-Entrée)

Couche #	Résistivité (ohm.m)	Épaisseur (m)	Profondeur (m)
1	200	5	0
2	50	30/25	5
3	10	5/10	35/30
4	3		40

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Cette analyse a permis d'identifier les limites de détection de cette couche. Les résultats de l'étude sont décrits en détail à l'annexe 4. Les principales conclusions de cette étude sont ici résumées. Pour le modèle de profondeur à la nappe salée de 100-130 m avec 5% d'erreur sur les résistivités apparentes, l'inversion non contrainte ne permet pas de déterminer la présence d'une zone de mélange pour une épaisseur inférieure à 10 m. Par contre, la profondeur à la nappe salée et sa résistivité sont toujours bien déterminées (erreur relative = 1%) quelque soit l'épaisseur de la zone de mélange. Pour une épaisseur de 30 m, l'inversion non contrainte retrouve l'épaisseur et la résistivité de la zone de mélange avec quelques % d'erreur relative sur les valeurs vraies.

Lorsqu'on contraint l'inversion en fixant la résistivité de la 3^{ème} couche à 10 Ω .m, on peut déterminer l'épaisseur de la zone de mélange lorsqu'elle est de 10 m et plus. Dans tous les cas ici également la profondeur et la résistivité de la nappe salée sont bien déterminées.

Pour les mêmes modèles mais en présence de bruit constant fixé à 0.9 nV/m², on obtient les mêmes résultats que précédemment. Si le bruit constant est augmenté à 3 nV/m², alors il n'est plus possible de déterminer la zone de mélange, même pour le cas d'une épaisseur de 30 m.

Pour le modèle de profondeur à la nappe salée de 40 m (type Grande-Entrée), avec 5% d'erreur sur les résistivités apparentes, l'inversion non contrainte ne permet pas de résoudre la zone de mélange si celle-ci est inférieure à 10 m. Pour 10 m et plus, celle-ci est bien déterminée. Si on contraint la résistivité de la 3^{ème} couche à 10 Ω .m, on peut alors résoudre la zone de mélange pour une épaisseur de 5 m et plus. Dans tous les cas, la profondeur et la résistivité de la nappe salée sont très bien déterminées.

Pour le même modèle, mais en ajoutant en plus un bruit constant sur les données de champs de 3nV/m², l'inversion non contrainte ne récupère pas les profondeurs et résistivité de la couche si celle-ci a une épaisseur de 5 ou 10 m.

5.5 Limitations du modèle en couches

La stratigraphie des îles sur les zones aquifères de grès rouge est quasi-horizontale et de composition relativement homogène et isotrope. Les niveaux d'eau suivent approximativement la topographie qui est faible aux îles et l'hydrostratification de la zone saturée en fonction de la salinité de l'eau est à faible pendage. Par conséquent, les sondages TEM sont interprétés pour chaque site de mesure sous forme d'un modèle de couches horizontales (modèle unidimensionnel ou 1D). Une manière de vérifier la validité du modèle unidimensionnel utilisé pour l'interprétation est de mesurer les composantes horizontales X et Y du champ magnétique secondaire simultanément avec la composante verticale Z. Rappelons que c'est sur cette dernière que repose l'interprétation en modèle de couches des sondages réalisés. Pour les cas de modèles unidimensionnels du sous-sol, on peut démontrer que les composantes horizontales du champ secondaire mesurées au centre de la boucle d'émission sont nulles. Dans le cas d'une variation latérale de résistivité (présence d'un contact, d'une faille, d'artéfacts métalliques) dans la région immédiate du sondage, des composantes horizontales du champ magnétique secondaire sont générées et l'interprétation du sondage sous forme de couches est discutable.

Aux îles, les composantes verticale (Z) et horizontales (X et Y) du champ secondaire ont été simultanément mesurées lors des sondages TEM dans la gamme de temps intermédiaires à long correspondant au système EM57 (fréquences de répétition 30, 7 et 3 Hz). Une bobine de réception à trois axes (3D-3 Tx coil de Geonics Ltd.) a été placée au centre de la boucle d'émission. Dans la majorité des sondages réalisés, les composantes X et Y sont de l'ordre de 100 fois plus faibles que la composante Z, ce qui garantit ainsi la validité de l'interprétation 1D. Pour quelques sites, les composantes X et Y sont de l'ordre de 3 à 10 fois plus faibles, ce qui indique la présence de variations latérales de résistivité à proximité du lieu de sondage. Pour ces cas particuliers, l'interprétation des paramètres (épaisseur, profondeur, résistivité) est à prendre avec précaution; ces sondages sont signalés dans le document lors de l'interprétation.

5.6 Effet de polarisation provoquée

Dans la stratigraphie des îles certaines couches superficielles peuvent présenter un certain contenu en matériau granulaire très fin (argile, argilite). Ces matériaux ont la propriété de « stocker » des charges électriques au passage du courant qui, à la suite de la coupure du champ primaire dans la boucle d'émission, se déchargent dans le milieu en générant un petit courant dit de « dépolarisation » qui à son tour donne lieu à une réponse magnétique enregistrée par la bobine de réception. Cette réponse arrive en général tard dans le temps de la mesure (quelques millisecondes) lorsque les courants générés par induction sont devenus très faibles et que la réponse de ceux-ci devient négligeable. Comme cette réponse de polarisation est de direction opposée à celle générée par induction, le champ secondaire mesuré peut présenter une inversion de polarité aux temps longs. Aux îles, cela arrive pour les sondages sur des terrains relativement résistants (pas de nappe salée près de la surface) à des temps de l'ordre de 5 à 10 millisecondes. Cet effet est montré à la figure 29 pour le sondage FAT01. Lors de l'interprétation, on élimine les données correspondant à l'apparition de ce phénomène.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

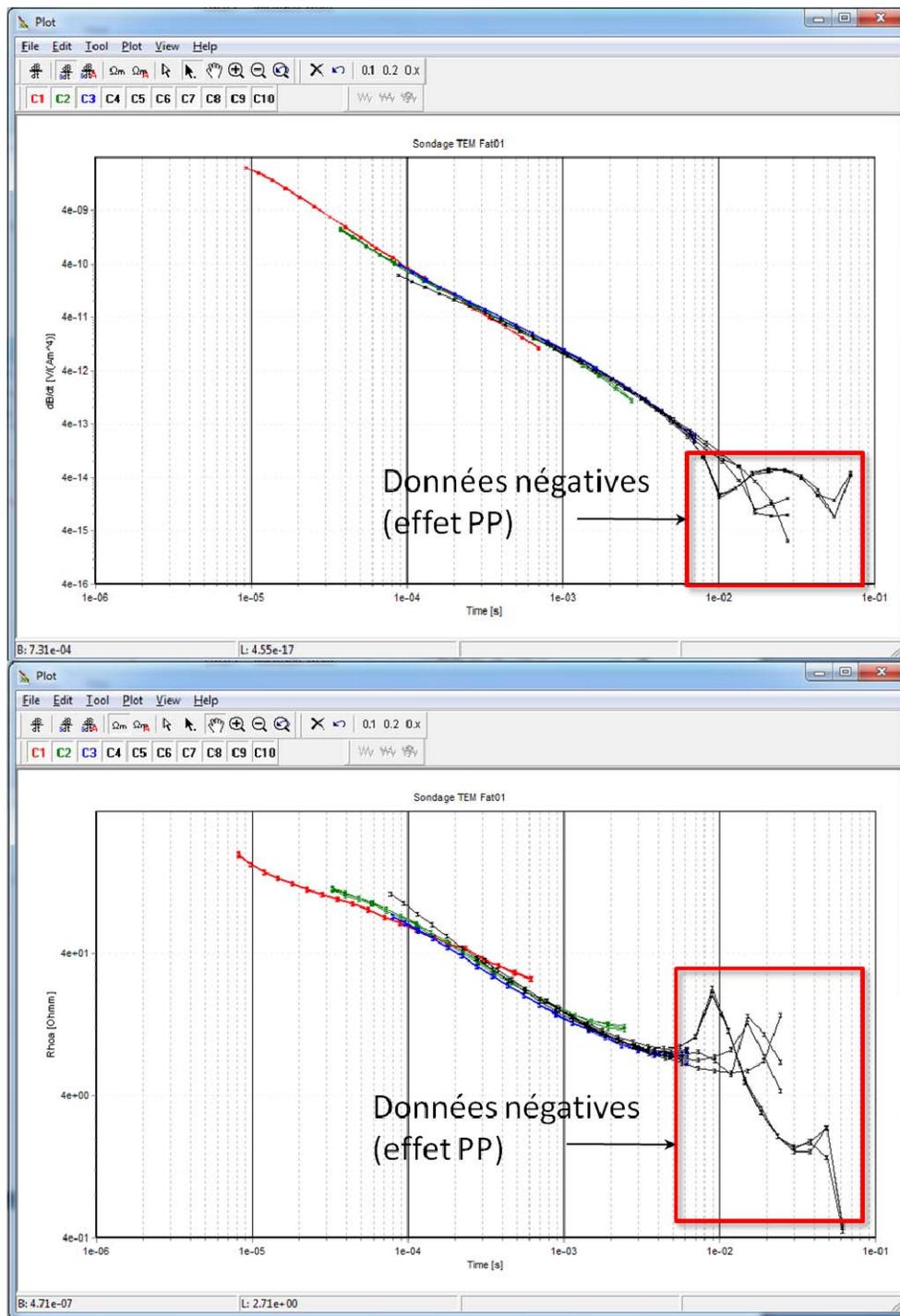


Figure 29: sondage FAT01 : effet de polarisation provoquée aux temps longs (>5 ms) qui provoque une inversion de polarité des données (de positive à négative); a) (haut) dérivée de la composante verticale du champ secondaire; b) (bas) résistivité apparente calculée à partir de la composante verticale du champ secondaire.

6. ÉLÉVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE-EAU SALÉE

Les profondeurs à la couche de résistivité comprise entre 2.0 et 4.0 ohm.m, associée au grès rouge saturée en eau salée, ont été relevées pour chaque île au droit des sondages TEM et les élévations (par rapport au niveau moyen des mers) déterminées et cartographiées à l'aide du logiciel Oasis Montaj (Geosoft inc.). Il faut préciser que certaines interprétations de sondages ont indiquées des couches conductrices en profondeur de l'ordre de 7 à 12 ohm.m. Cette résistivité semble un peu haute par rapport à la résistivité effective attendue pour un grès montrant 30% de porosité et une eau salée de concentration équivalente à l'eau de mer (nos estimations et l'interprétation de certains sondages TEM montrent que cette résistivité du grès saturée en eau salée devrait être de l'ordre de 2-3 ohm.m). On pourrait l'expliquer par une réduction de la porosité d'environ 1/3 ou par la diminution de la salinité de l'eau ou encore, par la détection d'un niveau géologique non relié à la nappe d'eau salée (argile, zone de faille, etc.). Dans ces cas, l'incertitude est grande sur l'origine de cette couche conductrice et on en a tenu compte dans la cartographie des élévations de la nappe salée. Cette estimation est discutée pour chacune des îles.

Également, la méthode TEM tel que déployée aux Îles-de-la-Madeleine est limitée à une pénétration d'environ 200-250 m maximum. Avec sa boucle de transmission de 100 x 100 m en quelques cas, ou le plus souvent de 50 m x 50 m x 2 tours, et des courants maximum de 20 A, certaines régions n'ont pas révélé des zones conductrices en profondeur. Pour ces sites, on indique que la profondeur à l'eau salée est supérieure à 250 m. Des tests ont été menés pour vérifier à quelle profondeur minimale il fallait placer une couche de 3 ohm.m pour que son effet se fasse sentir sur la réponse au-delà de la gamme des temps mesurés. Lorsqu'une telle analyse a été faite elle est indiquée dans la colonne *Remarques* des tableaux récapitulatifs.

Pour chaque secteur, les élévations estimées par sondages TEM sont comparées avec les estimés obtenus à partir de la relation de Ghyben-Herzberg et des données (validées) des niveaux d'eau dans les puits disponibles. Ces niveaux d'eau ont été extraits des rapports de

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Madelin'Eau de 2004 et de 2009 (voir Références). Les données récentes des niveaux d'eau dans les puits de juin et août 2011, obtenues d'Annick Petitpas, technicienne en hydrogéologie à l'emploi de la Municipalité des Îles, ne sont pas utilisables à l'heure actuelle car elles ne sont pas calibrées. Elles seront ajoutées à l'estimation de l'interface eau douce/eau salée dès que les corrections appropriées auront été faites.

La relation de Ghyben-Herzberg, qui donne l'élévation du niveau de l'interface (figure 30), dépend du contraste de densité entre l'eau douce et l'eau salée. Ces densités dépendent de la concentration en sels et de la température. Pour l'estimation des élévations ici, les valeurs de 1.0 et 1.025 pour les densités de l'eau douce et l'eau salée ont été respectivement prises. Avec ces estimés, l'élévation de l'interface (sous le niveau moyen des mers) se trouve à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique de la nappe d'eau douce dans les puits.

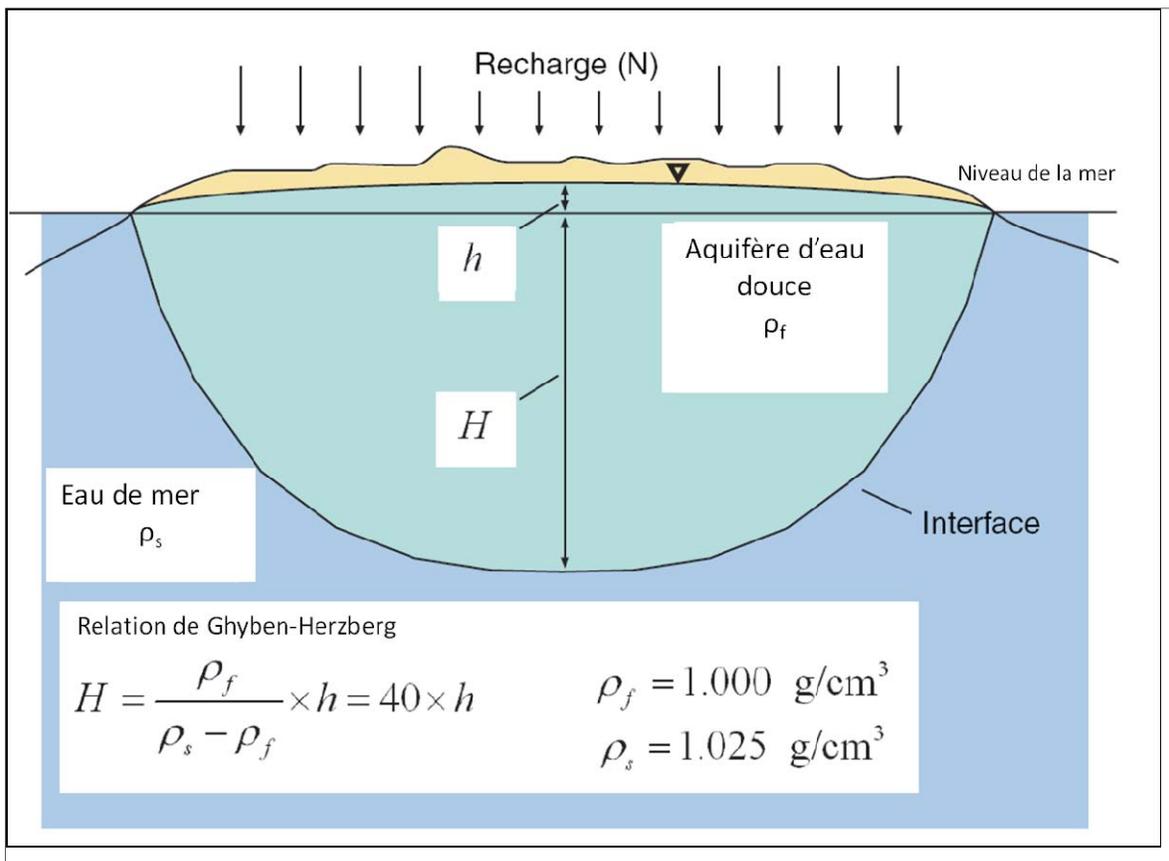


Figure 30 : relation de Ghyben-Herzberg pour l'élévation sous le niveau moyen des mers de l'interface eau douce/eau salée

6.1 Havre-Aubert

D'après le tableau 8 donnant les élévations à l'interface eau douce/eau salée, une carte a été tracée des élévations et superposée sur la carte topographique du secteur (figure 31). On remarque que l'élévation (négative) de la nappe est toujours supérieure à -150 m, en majorité supérieure à -200 m. Pour bien des stations TEM, on n'a pu détecter un horizon conducteur en profondeur, donc bien au-delà de la portée de 250 m du système. Deux exceptions : les sondages HA10 et HA11. Ces derniers montrent un conducteur de $\sim 10 \Omega.m$ à une élévation de -41/-45 m. La résistivité n'est pas assez basse pour être associée au grès saturé en eau salée. Après vérification, les réponses sur le champ secondaire des composantes X et Y sont relativement fortes (10 à 30% de Z), ce qui indique une réponse affectée par des effets latéraux, possiblement des clôtures ou des conduites métalliques. Les niveaux statiques dans les puits, relevés en 2003 par Madelin'Eau, indiquent que l'interface eau douce/eau salée (ED-ES en abrégé) devrait se trouver à une élévation supérieure à -370 m (tableau 9). Comme les estimés des sondages TEM sont des minimums, il y a accord entre les évaluations TEM et Ghyben-Herzberg.

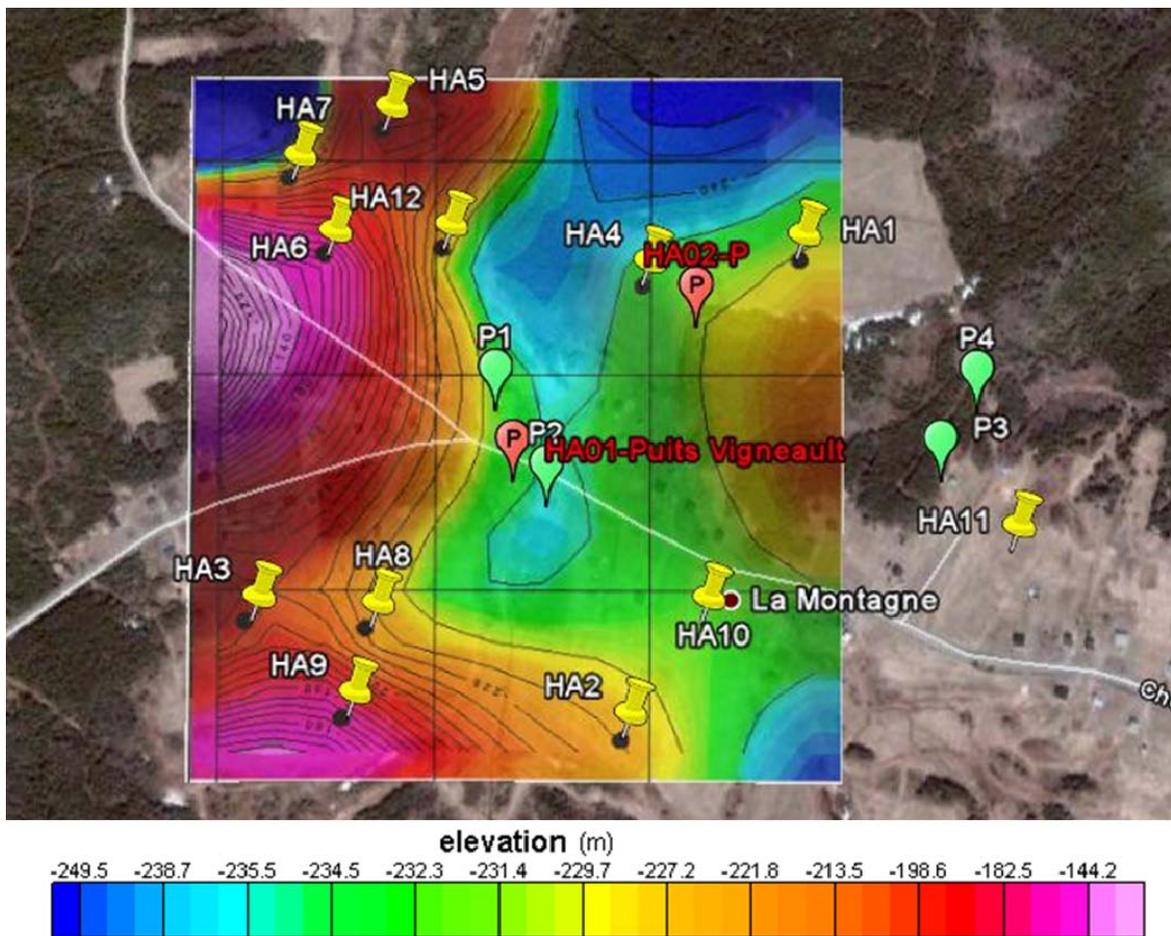


Figure 31 : carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Havre-Aubert

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Sondages	Latitude	Longitude	alt. (m)	prof/sol (m)	prof. corr. (m)	elev. (m/nmm)	elev. corr. (m/nmm)	ρ (ohm.m)	$\sigma. p$ %	$\sigma. res$ %	remarques
HA01	N47°14'56.3"	W061°57'57.1"	20.9	249.3	249.3	-228.4	-228.4	3	1	xxx	prof. min.
HA02	N47°14'41.80"	W061°58'04.80"	28.2	250	250	-221.8	-221.8	3	1	xxx	prof. min.; res. fixée
HA03	N47°14'45.30"	W061°58'21.40"	23.4	237	237	-213.6	-213.6	3	4	xxx	prof. min; res. fixée
HA04	N47°14'55.50"	W061°58'04.00"	18.6	350	250	-331.4	-231.4	3	1	xxx	prof. min.; res. fixée
HA05	N47°15'00.20"	W061°58'15.6"	14.5	210	210	-195.5	-195.5	3	1	xxx	prof. min.; effet PP précoce
HA06	N47°14'56.40"	W061°58'18.10"	15.2	170	170	-154.8	-154.8	3	1	xxx	prof. min.; effet PP précoce
HA07	N47°14'58.70"	W061°58'19.70"	15.0	290	250	-275	-235	3	11	xxx	prof. min.; res. fixée
HA08	N47°14'45.10"	W061°58'16.10"	21.0	277.5	250	-256.5	-229	3	5	xxx	prof. min.; res. fixée
HA09	N47°14'42.40"	W061°58'17.10"	23.8	200	200	-176.2	-176.2	3	2	xxx	prof. min.; effet PP précoce
HA10	N47°14'45.10"	W061°58'00.60"	23.9	68.8	68.8	-44.9	-44.9	7.2	2	2	effet 2-D
HA11	N47°14'47.50"	W061°57'47.60"	32.0	73.2	73.2	-41.2	-41.2	12.2	3	3	effet 2-D
HA12	N47°14'56.60"	W061°58'12.90"	14.0	251.9	250	-237.9	-236	3	13	xxx	prof. min.; res. fixée

Tableau 8 : Havre-Aubert : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Puits Havre-Aubert	X (MTM)	Y (MTM)	alt. (m)	niveau piézom. (m/nmm)	Profondeur puits (m)	elev. Interface ED/ES (m/nmm)
P1	269253	5234368	16.5	9.32	70	-372.8
P2	269301	5234278	18.5	9.36	70	-374.4
P3	269670	5234300	34.1	9.79	77.3	-391.6
P4	269705	5234365	31.2	9.36	67.7	-374.4
Puits PZ (Vigneau)			18.2	9.53	70	-381.2

Tableau 9 : Havre-Aubert : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg

6.2 Étang-du-Nord

La figure 32 présente la carte des élévations de l'interface eau-douce/eau salée dans le secteur d'Étang-du-Nord. Ces élévations se retrouvent au tableau 10. La carte a été superposée à la carte topographique tirée de Google Earth. On peut diviser la région couverte en deux zones : la zone ouest et la zone est. La zone ouest couvre les nouveaux puits et piézomètres de 2009 (EDN-09-01 à EDN-09-04). La nappe se trouve à une élévation minimum de -180 m (/nmm). Ce résultat est conforme avec les estimés de l'interface ED-ES obtenues au tableau 11 où l'on observe que la nappe devrait se trouver à une élévation de -250 m ou plus.

Par opposition, la zone est qui s'étale de la mer au sud jusqu'au pied de la bute au nord, voit la nappe salée s'enfoncer de l'élévation -40 m jusqu'à -130 m entre ETAN07 et ETAN11 pour remonter à -100 près de la route 199. Les puits municipaux P1 et P2 se trouvent dans le voisinage d'ETAN15 et d'ETAN10/ETAN11 respectivement. Ces puits ont une profondeur de 63.7 et 61 m respectivement, soit une élévation de -26.2 et -30.9 m de leurs fonds.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

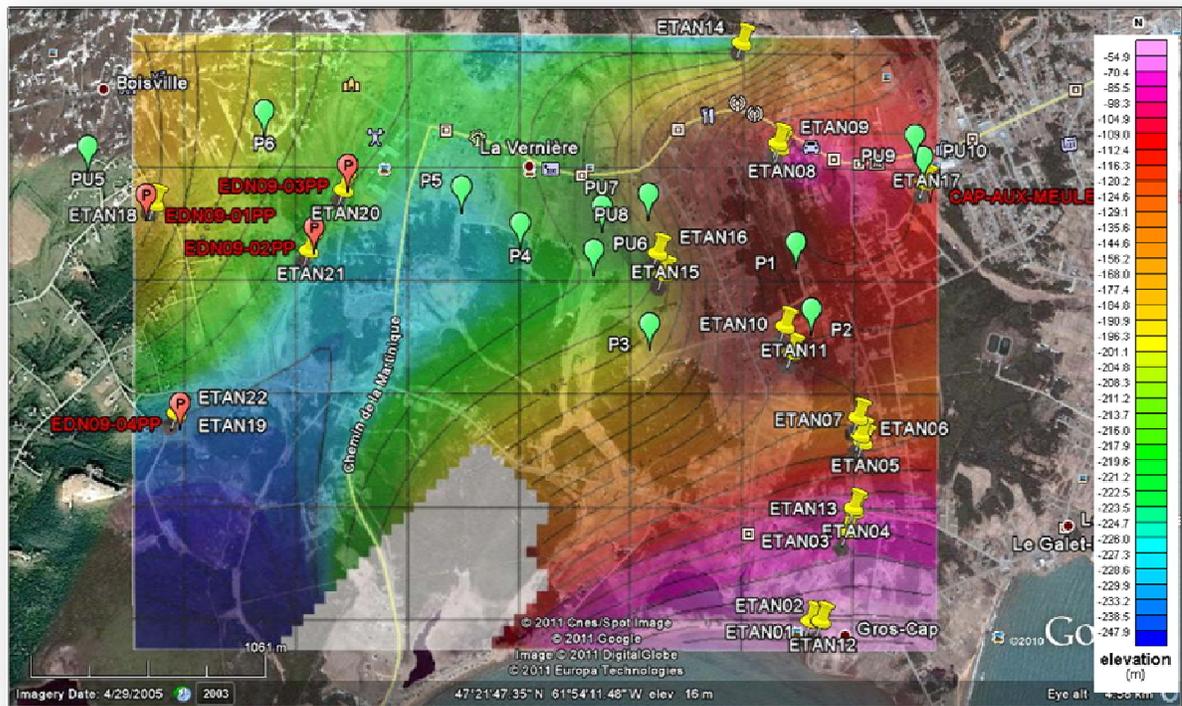


Figure 32: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Étang-du-Nord

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Sondages	Latitude	Longitude	alt (m)	prof/ sol (m)	prof. corr. (m)	ρ (ohm.m)	elev. (/nmm)	elev. corr. (/nmm)	σ p.%	σ res.%	remarques
Etan01	N47°21'06.7"	W61°53'26.5"	1.0	40.4	40.4	3.1	-39.4	-39.4	1	1	
Etan02	N47°21'06.7"	W61°53'24.2"	2.6	44.6	44.6	2.8	-42.0	-42.0	1	1	
Etan03	N47°21'20.0"	W61°53'18.8"	14.0	87.4	87.4	3.1	-73.4	-73.4	1	2	
Etan04	N47°21'23.2"	W61°53'17.4"	15.1	92.7	92.7	2.5	-77.6	-77.6	1	3	
Etan05	N47°21'32.8"	W61°53'15.5"	22.3	141	141	2.8	-118.7	-118.7	1	5	
Etan06	N47°21'36.4"	W61°53'16.6"	20.6	149.6	149.6	3.4	-129.0	-129.0	1	9	
Etan07	N47°21'33.8"	W61°53'16.0"	21.6	141	141	3.4	-119.4	-119.4	1	4	
Etan08	N47°22'15.4"	W61°53'33.6"	35.2	108	108	1.4	-72.8	-72.8	2	11	
Etan09	N47°22'16.1"	W61°53'33.9"	35.4	138.2	138.2	2.8	-102.8	-102.8	2	23	
Etan10	N47°21'49.6"	W61°53'32.3"	24.2	141	141	5.1	-116.8	-116.8	5	11	
Etan11	N47°21'45.8"	W61°53'30.8"	22.9	157	157	2.9	-134.1	-134.1	2	18	
Etan12	N47°21'6.60"	W61°53'24.30"	2.4	42.6	42.6	2.9	-40.2	-40.2	1	1	
Etan13	N47°21'22.80"	W61°53'17.20"	15.0	95.6	95.6	2.5	-80.6	-80.6	1	4	
Etan14	N47°22'30.60"	W61°53'41.70"	33.7	320.3	250	3	-286.6	-216.3	5	xxxx	prof. min; res 3 Ω .m fixé
Etan15	N47°21'57.10"	W61°53'58.40"	21.2	228.7	228.7	4.3	-207.5	-207.5	2	15	
Etan16	N47°22'0.20"	W61°53'59.60"	24.0	234.2	234.2	3.8	-210.2	-210.2	6	15	
Etan17	N47°22'10.50"	W061°53'02.30"	11.4	122.1	122.1	2.2	-110.7	-110.7	1	4	
Etan18	N47°22'07.11"	W061°55'47.3"	29.1	205.1	205.1	3	-176.0	-176.0	6		prof. min; res 3 Ω .m fixé
Etan19	N47°21'36.6"	W061°55'42.6"	20.0	291	250	3	-271.0	-230.0		xxxx	prof. min; res 3 Ω .m fixé
Etan20	N47°22'09.2"	W061°55'06.8"	30.0	340.3	250	3	-310.3	-220.0	3	xxxx	prof. min; res 3 Ω .m fixé
Etan21	N47°22'00.4"	W061°55'14.2"	24.5	474	250	3	-449.5	-225.5		xxxx	prof. min; res 3 Ω .m fixé
Etan22	N47°21'36.80"	W061°55'42.60"	20.0	299	250	3	-279.0	-230.0		xxxx	prof. min; res 3 Ω .m fixé

Tableau 10 : Étang-du-Nord : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Puits Étang-du-Nord	X (MTM)	Y (MTM)	alt. (m)	niveau piézom. (m/nmm)	Profondeur puits (m)	elev. Interface ED/ES (m/nmm)
P1	275241	5247568	37.5	3.6	63.7	-144
P2	275309	5247271	30.1	3.23	61	-129.2
P3	274583	5247208	16.1	3.73	36.9	-149.2
P4	274004	5247659	24	6.33	45.7	-253.2
P5	273742	5247822	30.9	7.37	57	-294.8
P6	272860	5248162	42.1	14.5	92.7	-580
PU5	272061	5248009	27.2	17.68?	n.d.	-707.2?
PU6	274333	5247539	24.3	5.19	n.d.	-207.6
PU7	274370	5247735	28.6	5.46	76.1	-218.4
PU8	274579	5247788	26.1	5.31	71.63	-212.4
PU9	275780	5248050	14.7	2.78	76.2	-111.2
PU10	275817	5247952	13.5	3.76	76.2	-150.4
Edn-09-01	272361	5247795	30.53	11.09	61.5	-443.6
Edn-09-02	273105	5247640	30.92	8.63	61.6	-345.2
Edn-09-03	273205	5247920	35.32	10.53	68	-421.2
Edn-09-04	272466	5246856	15.53	5.75	43.2	-230

Tableau 11 : Étang-du-Nord : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

En comparant les estimés TEM et ceux de la relation Ghyben-Herzberg (tableaux 10 et 11), on constate une très bonne concordance au niveau des puits P1, P2 et P3 et les stations TEM voisines ETAN10 et ETAN11. L'interface ED-ES est détectée entre -120 et -140 m. Il en est de même des puits PU9 et PU10 avec les sondages ETAN17 et ETAN09, tous détectant l'interface entre -100 et -130 m.

6.3 Fatima

La figure 33 présente la carte des élévations de l'interface eau-douce/eau salée dans le secteur de Fatima. Ces élévations se retrouvent au tableau 12. La carte a été superposée à la carte topographique tirée de Google Earth. Comme pour Étang-du-Nord, on peut séparer la carte en deux zones : la zone ouest où la nappe saline est en général profonde (élévation -220 m) et la zone est où la nappe est à une élévation inférieure à -160 m (/nmm). Dans la zone ouest, la station FAT13 semble indiquer la présence d'une nappe à -83 m. D'après le tableau 13, l'interface devrait se trouver à très grande profondeur (élévation minimale de -210 m).

Dans la zone est, la nappe s'enfonce du nord, près de la côte, vers l'intérieur au sud. La présence de la nappe à l'est de cette zone est aussi notée, s'enfonçant de l'est vers l'ouest (FAT08 vers FAT09). Une remontée de la zone conductrice est détectée sous les stations FAT03 et FAT07 qui se trouvent dans le voisinage du puits P8. Cette remontée à des élévations de l'ordre de -61 m est inattendue d'autant plus que la relation de Ghyben-Herzberg (tableau 13) donne des estimés supérieurs à -400 m. Il est difficile de réconcilier les deux estimés : les sondages TEM auraient pu être affecté par des effets latéraux (composantes X et Y non disponibles pour ces sondages). Il faut noter également que les mesures du niveau statique dans les puits de cette zone datent de 2003 (Madelin'Eau, 2004) et que les conditions d'utilisation de la relation de Ghyben –Herzberg ne sont peut-être pas vérifiées.

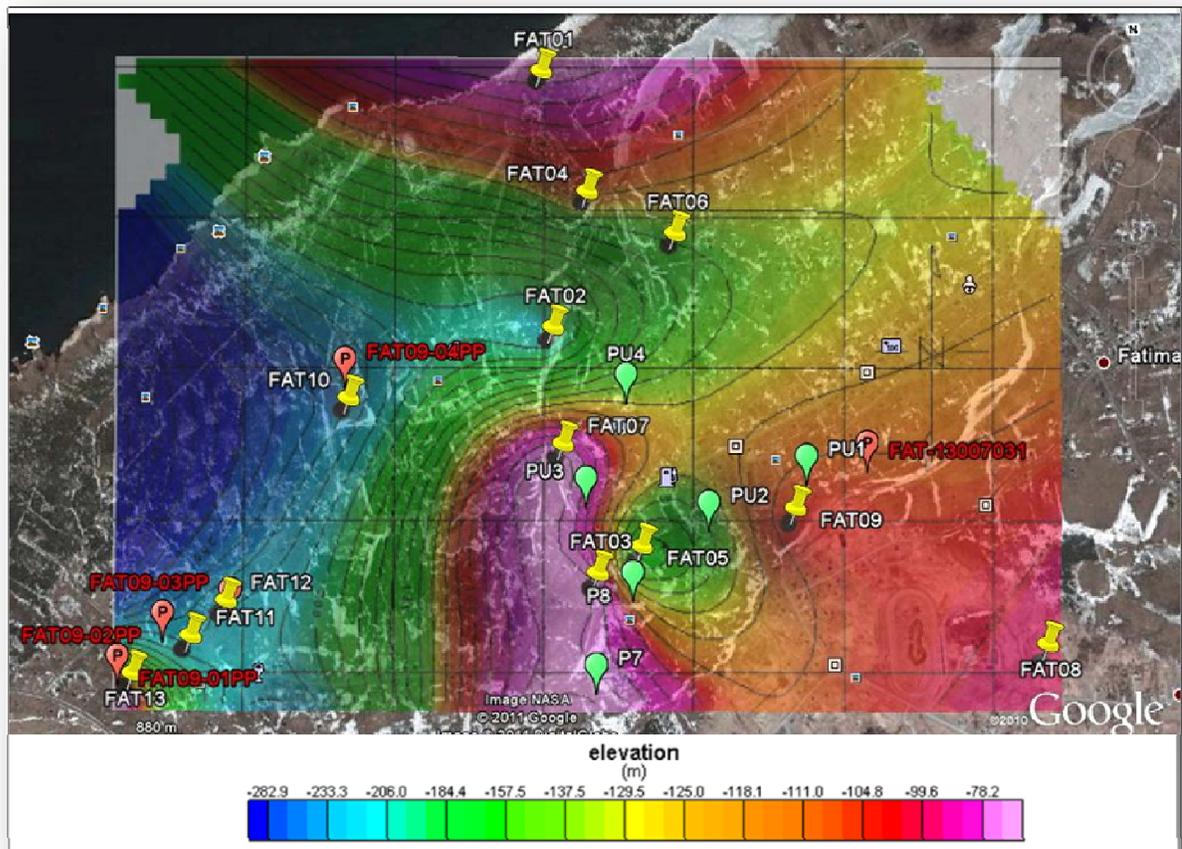


Figure 33: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Fatima

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Sondages	Latitude	Longitude	alt. (m)	prof/ sol (m)	prof. corr. (m)	ρ (ohm.m)	elev.(/nmm)	elev. Corr.(/nmm)	σ p %	σ res %	remarques
Fat01	N47°24'54.5"	W61°54'30.9"	0.0	68.2	68.2	3.2	-68.2	-68.2	1	2	
Fat02	N47°24'26.7"	W61°54'28.9"	10.0	216	216	6.7	-206.0	-206.0	2	18	
Fat03	N47°24'00.2"	W61°54'21.7"	23.0	84	84	5.7	-61.0	-61.0	297	3	
Fat04	N47°24'41.4"	W61°54'23.5"	6.7	129	129	4.6	-122.3	-122.3	3	4	
Fat05	N47°24'03.10"	W61°54'14.70"	28.0	193	193	7.4	-165.0	-165.0	2	7	
Fat06	N47°24'36.90"	W61°54'09.50"	5.3	146.9	146.9	2.9	-141.6	-141.6	2	6	
Fat07	N47°24'14.10"	W61°54'27.30"	13.4	76	76	6.7	-62.6	-62.6	2	3	
Fat08	N47°23'52.60"	W61°53'10.00"	17.0	114.8	114.8	3.4	-97.8	-97.8	1	4	
Fat09	N47°24'07.20"	W061°53'50.20"	16.8	121.5	121.5	4.8	-104.7	-104.7	31	5	
Fat10	N47°24'19.0"	W061°55'01.4"	18.0	320.2	250	3	-302.2	-232.0			xxx prof.min; 3 Ω .m fixé
Fat11	N47°23'53.4"	W061°55'26.3"	33.7	328	250	3	-294.3	-216.3	13		prof.min; 3 Ω .m fixé
Fat12	N47°23'57.2"	W061°55'20.7"	32.3	352	250	3	-319.7	-217.7	2		xxx prof.min; 3 Ω .m fixé
Fat13	N47°23'49.3"	W061°55'35.6"	29.8	112.6	112.6	6	-82.8	-82.8	1	5	

Tableau 12 : Fatima : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Puits Fatima	X (MTM)	Y (MTM)	alt. (m)	niveau piézom. (m/nmm)	Profondeur puits (m)	elev. Interface ED/ES (m/nmm)
P7	274164	5250935	42	29.41	62.2	-1176.4
P8	274287	5251240	33.4	15.55	48.8	-622
PU1	274869	5251625	20.2	9.6	60.01	-384
PU2	274540	5251473	29.3	10.16	71.63	-406.4
PU3	274132	5251554	21.9	7.38	77.3	-295.2
PU4	274267	5251899	17.3	n.d.	n.d.	n.d.
Fat-09-01	272563	5250968	33.45	27.21	52.4	-1088.4
Fat-09-02	272711	5251114	33.81	26.26	61.6	-1050.4
Fat-09-03	272917	5251185	33.97	27.48	55.5	-1099.2
Fat-09-04	273308	5251954	22.44	5.32	49.4	-212.8

Tableau 13 : Fatima : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg

6.4 Havre-Aux-Maisons

La figure 34 présente la carte des élévations de l'interface ED-ES dans le secteur d'Havre-Aux-Maisons. Ces élévations se retrouvent au tableau 14. La carte a été superposée à la carte topographique tirée de Google Earth. La distribution de l'élévation de la zone conductrice est ici très déroutante. On trouve une bande peu profonde dans la partie sud en bordure des reliefs de la Butte à Cajetan (formée des roches de la Formation de Cap-au-Diable avec basaltes, roches pyroclastiques et calcaires cristallins).

. Les stations HAM03, 06, 09, 10 et 12 montrent une élévation de cette couche conductrice entre -40 et -100 m. Sur une bande E-W plus au nord, on retrouve des élévations négatives plus importantes, entre -160 et -200 m. Finalement, les stations les plus au nord, HAM08 et HAM14 détectent la zone conductrice à -120/-145 m.

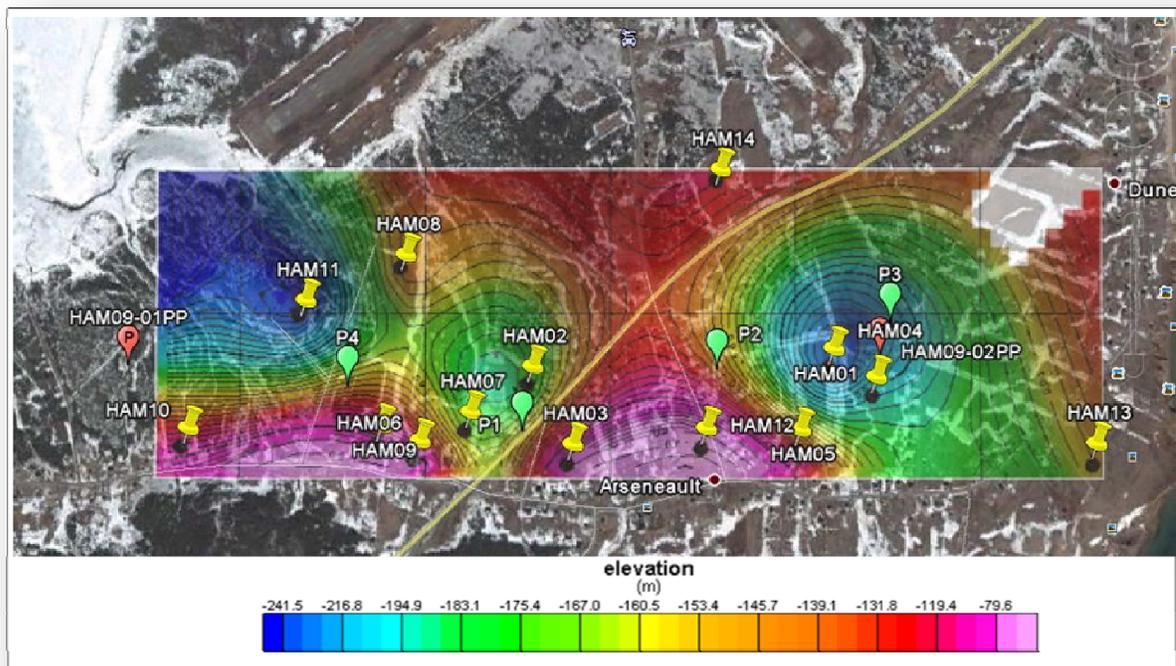


Figure 34: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur d'Havre-Aux-Maisons

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Sondages	Latitude	Longitude	alt. (m)	prof/sol (m)	prof. corr. (m)	ρ (ohm.m)	elev./nmm	elev. Corr./nmm	σ p. %	σ res. %	remarques
Ham01	N47°24'50.5"	W061°45'58.7"	15.4	209	209	9.9	-193.6	-193.6	1	1	
Ham02	N47°24'51.4"	W061°46'43.1"	13.0	196.8	196.8	6.3	-183.8	-183.8	5	1	
Ham03	N47°24'44.6"	W061°46'37.9"	22.0	78	78	4.6	-56.0	-56.0	2	5	
Ham04	N47°24'53.0"	W061°46'4.2"	14.0	460	250	3	-446.0	-236.0	21	xxx	prof. min.; 3 Ω .m fixé
Ham05	N47°24'45.9"	W061°46'8.6"	20.7	147.9	147.9	7.7	-127.2	-127.2	1	5	
Ham06	N47°24'44.9"	W061°46'57.6"	19.3	88	88	4.3	-68.7	-68.7	1	3	
Ham07	N47°24'47.4"	W061°46'51.1"	15.0	185.9	185.9	6.3	-170.9	-170.9	8	4	
Ham08	N47°25'1.2"	W061°46'59.5"	10.0	155	155	7.3	-145.0	-145.0	8	6	
Ham09	N47°24'46.2"	W061°47'2.6"	19.2	102	102	6.9	-82.8	-82.8	2	3	
Ham10	N47°24'46.0"	W061°47'27.6"	18.9	126	126	2.9	-107.1	-107.1	1	4	
Ham11	N47°24'57.2"	W061°47'12.5"	8.4	268	250	3	-259.6	-241.6	3	xxx	prof. min.; 3 Ω .m fixé
Ham12	N47°24'46.0"	W061°46'20.7"	24.8	62	62	4.9	-37.2	-37.2	44	6	4ème couche à 0.7 Ω .m?
Ham13	N47°24'44.7"	W061°45'30.3"	20.7	176.6	176.6	10.4	-155.9	-155.9	13	6	
Ham14	N47°25'08.7"	W061°46'18.8"	10.7	131.4	131.4	3.4	-120.7	-120.7	1	3	

Tableau 14 : Havre-Aux-Maisons : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Puits Havre-Aux-Maisons	X (MTM)	Y (MTM)	alt. (m)	niveau piézom. (m/nmm)	Profondeur puits (m)	elev. Interface ED/ES (m/nmm)
P1	283760	5252687	21.4	5.57	n.d.	-222.8
P2	284287	5252853	22.4	5.31	n.d.	-212.4
P3	284575	5252978	20.4	4.82	35	-192.8
P4	283287	5252811	19.3	5.42	36.3	-216.8
HAM-09-01 PP	282694	5252865	12.04	4.16	43.3	-166.4
HAM-09-02-PP	284746	5252880	21.3	4.25	48.8	-170

Tableau 15 : Havre-Aux-Maisons : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg

Si on compare les estimés avec ceux de la relation de Ghyben-Herzberg, on observe une bonne concordance des élévations pour les puits P1 avec la station voisine HAM07 (-222.8 et -170.9), P2 avec la station HAM01 (-212.4 et -193.6), P3 et HAM-09-02PP avec HAM01 encore (-192.8, -170.0 et -193.6) et P4 avec HAM11 (-216.8 et -241.6). Cependant toutes les stations TEM du sud ont des élévations de l'interface (entre -40 et -100) bien inférieures aux estimés des puits (entre -170 et 220 m). Dans ce cas, il se pourrait que la zone conductrice détectée soit une structure géologique telle une faille et non la zone salée. Les résistivités trouvées sont dans la gamme des valeurs anticipées (entre 3 et 6 $\Omega.m$) mais l'alignement orthogonal de la zone conductrice par rapport aux deux fronts de mer favorise l'origine structurale. Madelin'Eau (2004) avait déjà interprété une faille dans cette zone à l'aide des profils de tomographie électrique. Il est intéressant de noter que leurs modèles de résistivité indiquent une zone étroite et subverticale conductrice à environ 20-40 m de profondeur (figure 35) à cet endroit. Des travaux supplémentaires seraient nécessaires afin de résoudre l'ambiguïté de l'interprétation sur cette zone.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

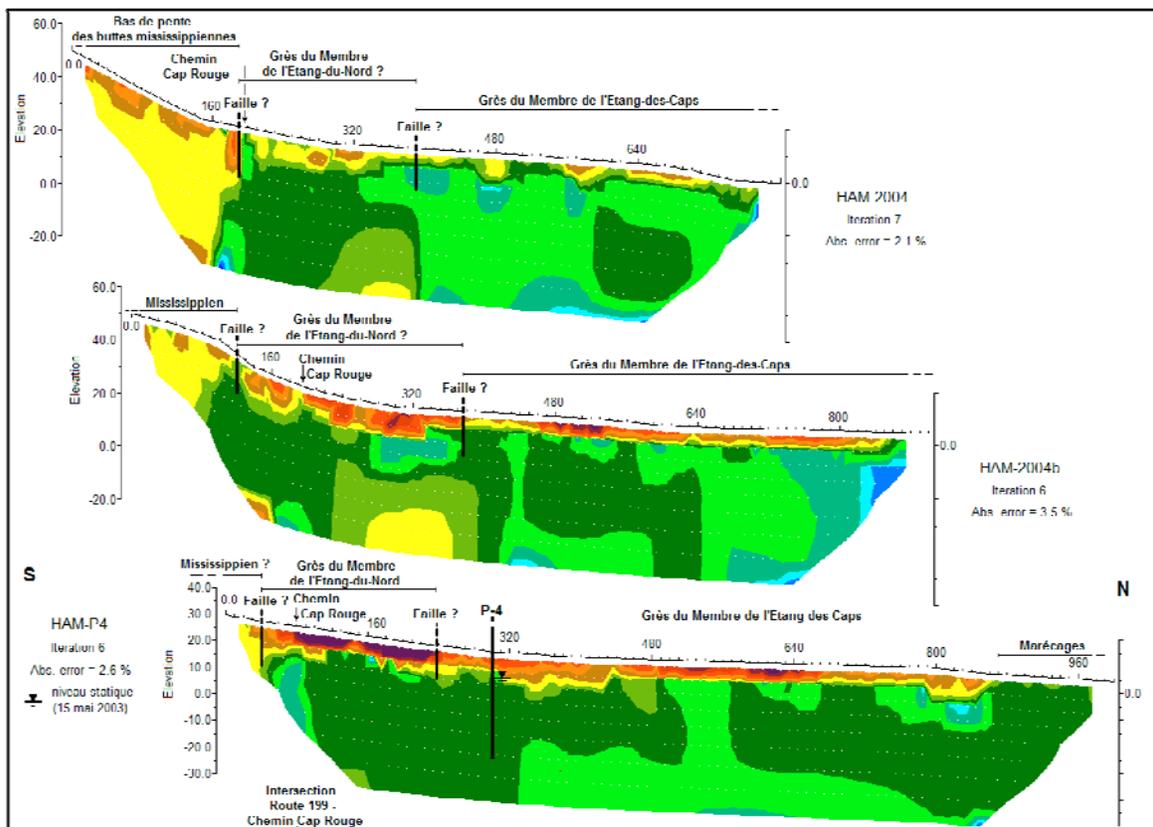


Figure 35 : modèles de résistivité obtenus sur trois profils nord-sud de tomographie de résistivité par Madelin'Eau (2004). Noter les zones étroites conductrices à 40 m de profondeur au droit de la faille présumée.

6.5 Grosse-Île

La figure 36 présente la carte des élévations de l'interface ED-ES dans le secteur de Grosse-Île. Ces élévations se retrouvent au tableau 16. La carte a été superposée à la carte topographique tirée de Google Earth. La distribution de l'élévation à l'interface est plutôt intrigante. Il faut aussi mentionner qu'avec quatre sondages l'interface est sous-échantillonnée. Elle semble relativement profonde ($\sim -140/-160$ m) en bordure sud du bras de mer (stations GI03 et GI04) alors qu'elle diminue à ~ -75 m vers l'intérieur à l'est (stations GI01 et GI02). Il n'existe pas de puits municipaux sur Grosse-Île et le niveau statique n'est pas connu. Poulin (1977), cité par Madelin'Eau (2004, p. 110), mentionne un dôme de piézométrie maximale de 15 m/nmm sur Grosse-Île Nord et de 36 m/nmm sur

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Grosse-Île Sud. Ces valeurs repoussent l'interface ED-ES à des élévations supérieures à 400 m.

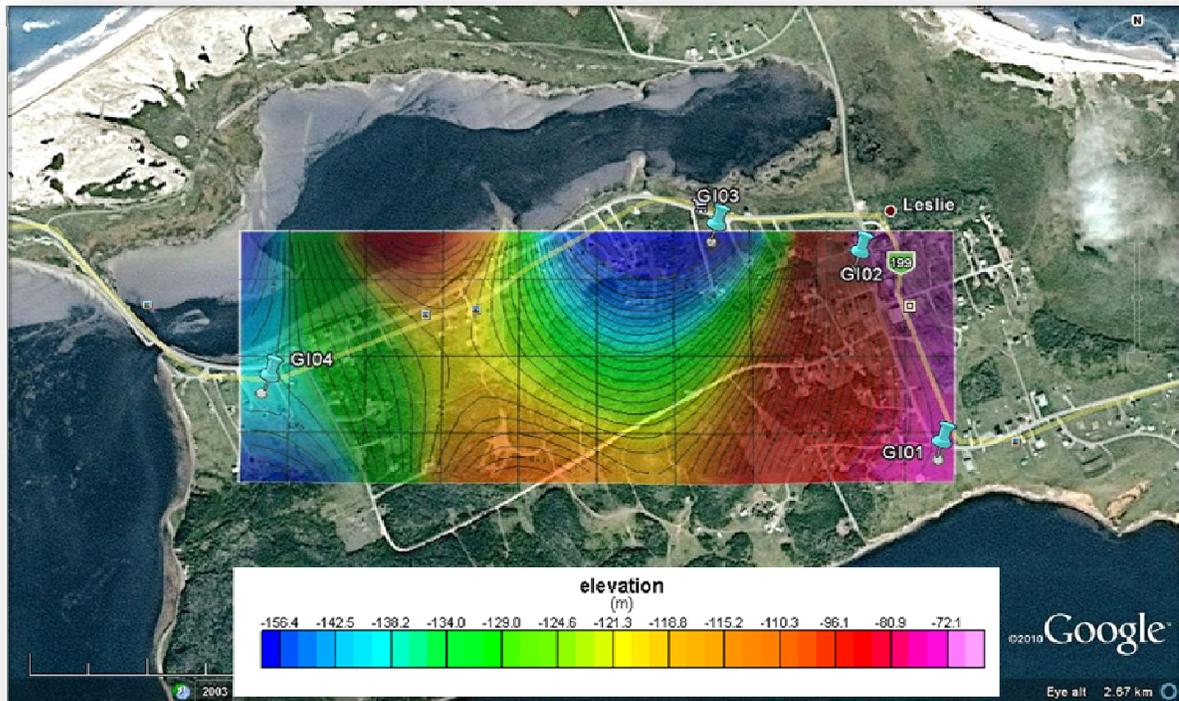


Figure 36: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Grosse-Île

6.6 Grande-Entrée

La figure 37 présente la carte des élévations de l'interface eau-douce/eau salée dans le secteur d'Étang-du-Nord. Ces élévations se retrouvent au tableau 17. La carte a été superposée à la carte topographique tirée de Google Earth. N'apparaît pas sur cette carte le sondage GE08 plus au nord de l'île (nappe à -19.8 m) car il ne peut être comparé à aucun puits et la distance avec les autres sondages est grande. Le sondage GE04 est affecté par des effets latéraux et son interprétation n'a pas été incluse dans les données ayant servies à générer la carte.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

On remarque à partir de la figure 37 et du tableau 17 que les élévations à l'interface ED-ES sont faibles, entre -30 et -50 m. Une comparaison avec le niveau de l'interface déduite par la relation de Ghyben-Herzberg (tableau 18) indique une bonne concordance.

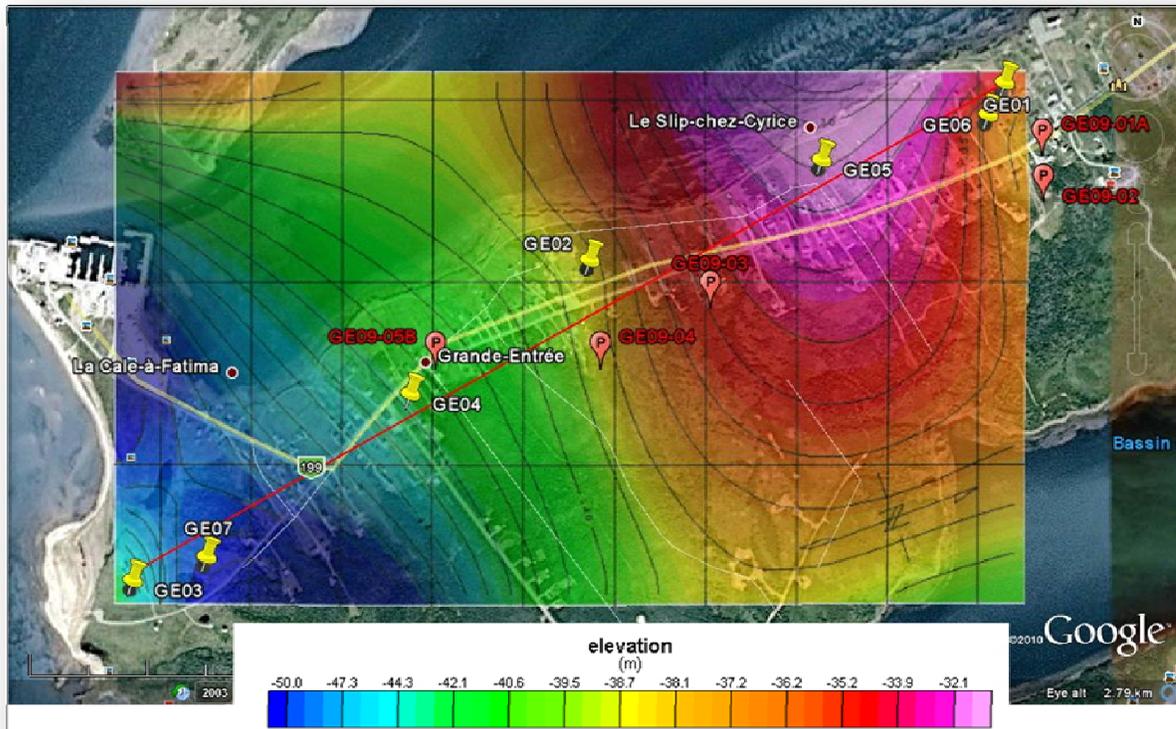


Figure 37: carte de l'élévation de la nappe sur le secteur de Grande-Entrée

Si on se fie aux données des puits, l'interface ED-ES devrait se trouver entre -52 et -65 m. Ces estimés sont de 20 à 30% plus grands que ceux déterminés par les sondages TEM. Encore une fois, la relation de Ghyben-Herzberg repose sur des conditions statiques et sur des densités de l'eau douce et de l'eau salée qui peuvent varier en fonction de la concentration en sel et de la température. Également, les puits sont tous situés au sud de la route 199, vers l'intérieur de l'île alors que les sondages sont situés au nord de la route, plus près du bord de mer; l'enfoncement de la nappe salée du nord vers le sud pourrait expliquer la différence dans les estimés des deux approches. Cette possibilité est renforcée

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

par les résultats de tomographies de résistivité réalisées par Madelin'Eau (2004). Sur la figure 38, la nappe salée s'enfonce du nord vers le sud du côté nord et se retrouve à une élévation de ~ -40 m à l'aplomb de la route 199.

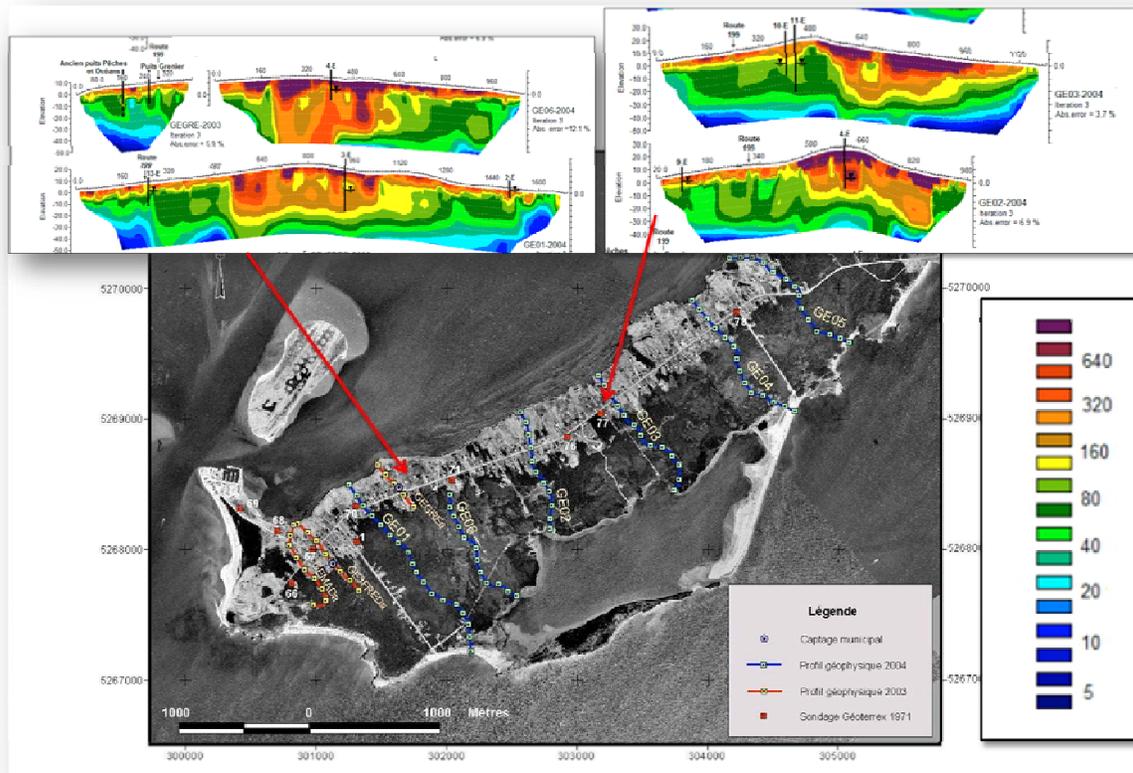


Figure 38 : sections 2D de résistivité électrique obtenues par tomographie électrique (Madelin'Eau, 2004) sur Grande-Entrée. Noter l'enfoncement de la nappe salée (en bleu) du nord vers le sud sur le rivage nord.

La variation de l'élévation de l'interface peut mieux s'observer sur une section NE-SO. À la figure 39, on remarque que la profondeur à l'interface est l'image miroir du profil topographique. Les fonds des puits se trouvent à une élévation comprise entre -18 et -31.5 m. Le puits GE09-03PP semble le plus vulnérable de l'ensemble.

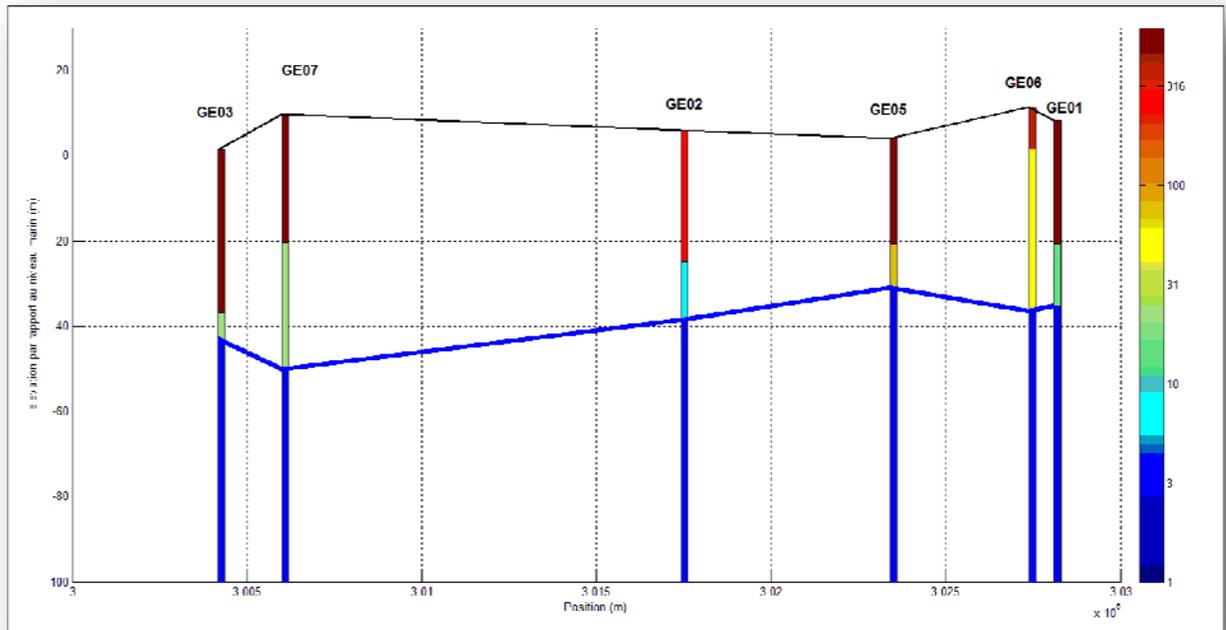


Figure 39 : Grande-Entrée : section des résistivités électriques obtenues par sondage TEM sur un profil NE-SO. La ligne bleue délimite l'interface eau douce-eau salée.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Sondages	Latitude	Longitude	alt. (m)	prof/sol (m)	ρ (ohm.m)	elev.(/nmm)	σ p. %	σ res. %	remarques
GI01	N47°36'55.18"	W061°30'53.36"	16.0	89.3	3.7	-73.3	2	11	
GI02	N47°37'11.23"	W061°31'3.52"	10.6	90.1	5.9	-79.5	15	5	
GI03	N47°37'13.57"	W061°31'21.49"	4.9	169	3	-164.1	2	2	
GI04	N47°37'0.76"	W061°32'17.67"	3.0	141.7	3.3	-138.7	12	21	

Tableau 16 : Grosse-Île : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Sondages	Latitude	Longitude	alt. (m)	prof/sol (m)	ρ (ohm.m)	elev. (/nmm)	σ p. %	σ res. %	remarques
Ge01	N47°33'37.3"	W061°31'35.19"	8.3	43.5	3.7	-35.2	3	1	
Ge02	N47°33'21.6"	W061°32'29.6"	6.0	44.6	3.3	-38.6	2	1	
Ge03	N47°32'53.19"	W061°33'29.66"	1.3	44.2	3.5	-42.9	290	4	
Ge04	N47°33'9.76"	W061°32'53.05"	15.2	23.9	2	-8.7	xxx	xxx	effet 2-D, composante Y importante
Ge05	N47°33'30.48"	W061°31'59.15"	4.0	35	3.8	-31.0	30	3	
Ge06	N47°33'34.43"	W061°31'37.43"	11.3	47.7	3.5	-36.4	9	2	
Ge07	N47°32'55.32"	W061°33'19.84"	9.8	60	3.9	-50.2	2	2	
GE08	N47°34'29.60"	W061°28'55.70"	2.0	21.8	3.9	-19.8	3	1	

Tableau 17 : Grande-Entrée : profondeur, élévation et résistivité de la couche conductrice associée à la nappe saline

Puits Grande-Entrée	X (MTM)	Y (MTM)	alt. (m)	niveau piézom. (m/nmm)	Profondeur puits (m)	elev. Interface ED/ES (m/nmm)
GE-09-01A	303136	5268853	21.31	1.31	41.2	-52.4
GE-09-02	302907	5268753	24.32	1.4	42.1	-56
GE-09-03	301983	5268441	10.69	1.38	42.1	-55.2
GE-09-04	301708	5268281	13.78	1.47	41.5	-58.8
GE-09-05	301235	5267978	18.72	1.63	42.1	-65.2

Tableau 18 : Grande-Entrée : élévation de l'interface eau douce/eau salée interprétée à partir des niveaux statiques et de la relation de Ghyben-Herzberg

7. SÉLECTION DES ZONES DE SUIVI

L'objectif ultime du projet est d'établir une méthodologie pour réaliser le suivi temporel des nappes salées. Comme ces nappes salées sont très conductrices et qu'elles présentent un contraste très fort de résistivité avec la formation aquifère d'eau douce située au-dessus, une combinaison de méthodes est proposée pour réaliser ce suivi : des mesures en continu de conductivité électrique de l'eau à divers niveaux, distribuées le long de puits aménagés dans des zones à risque, et des mesures TEM répétées dans le temps sur des sites à proximité des puits. Comme l'interprétation a été fondée sur la relation anticipée entre les zones de faible résistivité (2-3 $\Omega.m$) et la nappe salée, il est essentiel d'avoir une validation des résultats obtenus dans la présente étude. Cette validation passera par le forage de puits sur certaines zones critiques, qui devront atteindre et dépasser le niveau de la nappe salée. La vérification du niveau de la nappe pourra se faire en effectuant des relevés de diagraphie EM dans les forages réalisés. L'emplacement des forages sera guidé par de multiples considérations, certaines dictées par le couplage avec les sondages TEM. Elles sont :

1. La proximité de puits en exploitation puisque la vulnérabilité à la variation de l'interface ED-ES est cruciale dans ce cas.
2. La profondeur estimée à l'interface qui va conditionner les coûts de forage; le plus près de la surface est le mieux. De plus, on ne devrait pas être préoccupé par des nappes se situant à des élévations importantes, disons à -150 m ou plus, car l'impact sur les puits de pompage à long terme serait faible à inexistant.
3. L'éloignement de source d'interférence électromagnétique : les sondages TEM qui seront répétés à période régulière ne doivent pas être contaminés par le bruit électromagnétique, ni par des installations faites par l'homme tel que des clôtures, conduites ou autres structures conductrices. Il faut prévoir qu'aucun développement ne viendra modifier ces conditions au cours du temps (i.e. des dizaines d'années).

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

4. L'accès au site : les sites de forage et de sondage TEM doivent être accessibles relativement facilement pour des véhicules à quatre roues motrices, et assez ouverts et dégagés pour permettre le déploiement de boucles d'émission TEM dimensions supérieures à 50 m x 50 m (dimensions minimums pour la boucle d'émission).

Suite aux études géophysiques entreprises (TEM, ERT et diagraphies EM) depuis 2009, en tenant compte des informations hydrogéologiques dans les puits, certains secteurs ont été définis comme plus vulnérables que d'autres aux intrusions salines et à leur évolution dans le temps. Ces secteurs sont :

1. **Grande-Entrée** : la ligne de nouveaux puits GE-09-01 à GE-09-05 forés en 2009 et en attente d'une certification d'exploitation, est située sur une zone présentant une faible élévation à la nappe salée, de l'ordre de -50 m.
2. **Étang-du-Nord** : sous la région autour des puits P1 et P2 la nappe se situe à une élévation d'environ -120 m. Dans la zone des puits PU9 et PU10 aussi on retrouve l'interface ED-ES à une élévation d'environ -110 m.
3. **Fatima** : deux zones pourraient faire l'objet d'études de suivi. La première zone est située autour du puits PU01. Dans cette zone la nappe est à une élévation interprétée de ~-100 m (FAT08 et FAT09) alors que le fond du puits PU1 se trouve à l'élévation -40 m/nmm. La deuxième zone inclut les puits P7, P8 et PU3 où un horizon conducteur étonnant est détecté à une élévation d'environ -60 m. Sachant que le fond des puits PU3 et P8 se trouvent à l'élévation -56 et -15 m/nmm, cette zone pourrait être à risque. Cependant l'élévation (-60 m) de l'interface dans cette région n'est pas en accord avec l'interprétation simple en utilisant la formulation de Ghyben-Herzberg qui donne plutôt des valeurs bien supérieures. On ne peut éliminer la possibilité d'effets latéraux (artéfacts conducteurs) ou d'une structure géologique. Vu l'incertitude sur l'origine de cette anomalie, on recommande de foncer un forage dans la bande délimitée par FAT03 et FAT07 pour une profondeur de 120 m.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

4. **Havre-Aux-Maisons** : Le secteur d'Havre-Aux-Maisons présente une interface ED-ES localisée à une élévation d'environ -170/-200 m à l'exception d'une bande E-O au sud qui indique un niveau conducteur à une élévation de -40/-80 m. Ce résultat, très surprenant et en désaccord avec les niveaux statiques disponibles, pourrait être causé par une structure géologique, en l'occurrence une faille. Pour lever l'ambiguïté sur son origine, on recommande une vérification par forage de cette zone sur une profondeur d'environ 130 m, puisque pour cette zone la profondeur maximale à l'horizon conducteur se trouve à 126 m.

Le reste du secteur n'est pas à risque car la profondeur maximale des puits en exploitation ou en instance de certification est de 48.8 m alors que les estimés de la profondeur à la nappe d'eau salée, par sondage TEM ou Ghyben-Herzberg, est supérieure à 180 m.

Le secteur d'Havre-Aubert dont la nappe est à une élévation supérieure à -200 m n'est pas vulnérable à une variation dans le temps de la nappe saline. Grosse-Île a peu été étudiée par les sondages TEM (quatre mesures seulement) et les informations hydrogéologiques sont minimales car il n'existe pas de puits exploités par la municipalité. Une étude des puits privés pourrait permettre d'améliorer nos connaissances; d'autres mesures géophysiques permettraient aussi d'améliorer la définition spatiale de l'interface ED-ES. Les estimés obtenus (élévations de -70 m à l'est et -130 à l'ouest) mettent pour l'instant les puits privés de faible profondeur à l'abri de remontée de nappe saline.

Pour tous les secteurs identifiés comme favorables au suivi temporel, on recommande de réaliser des forages verticaux NQ ou HQ de diamètre externe 76 ou 96 mm, de longueur de 30 m supérieure au moins à la profondeur attendue à l'interface ED-ES au site sélectionné. Le diamètre doit être choisi assez grand pour permettre les levés de diagraphie EM (typiquement 40 mm) et l'installation permanente d'une grappe de sondes multiparamètres (conductivité électrique, pression, température). Le choix de ces sondes

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

a une incidence sur le diamètre des trous et vice versa. Comme on ne s'attend pas à des grandes variations rapides de l'interface aux cours des années, on recommande de concentrer les sondes autour de l'interface, incluant la zone salée, la zone de mélange et la zone d'eau douce et d'espacer de plus en plus la distance entre sondes lorsqu'on s'éloigne de la zone de transition.

Le site pour le suivi par sondage TEM se fera dans le voisinage immédiat (moins de 100 m) du forage implanté pour permettre la calibration des résultats en tout temps. Le site idéalement devrait être découvert, avoir une dimension minimale de 50 m x 50 m et ne pas se trouver à proximité des sources actives d'interférence EM ni de structures métalliques (clôtures, barrières, conduites, fils) pouvant générer des distorsions dans les réponses. La position de la boucle carrée d'émission TEM devrait être déterminée avec précision (arpentage DGPS avec RTK) pour replacer exactement au même endroit la boucle à la prochaine mesure de suivi. Cette condition est très importante pour ne pas générer des changements seulement attribuables à des variations géométriques du sondage. On peut de nos jours facilement obtenir une résolution meilleure que 5 cm sur la position. L'équipement de sondages TEM recommandé est constitué d'un récepteur Protem D, des émetteurs EM47 et EM57 et des bobines de réception 3D-HF et 3D-BF; toutes ces composantes sont manufacturés par la compagnie Geonics Ltd. (Toronto, Ontario). Si pour des raisons de disponibilité au cours des années ce matériel n'était pas ou plus disponible et qu'il fallait le remplacer par un autre (par exemple, le terraTEM d'Alpha Geoinstruments), on recommande de comparer les deux systèmes et de calibrer le second par rapport au premier pour s'assurer que les variations notées ne soient pas dues aux systèmes utilisés mais bien aux changements de conditions du sol. Il est aussi fortement recommandé d'utiliser le même logiciel d'interprétation, chacun ayant ses particularités, ses codages propres, ses limitations. Dans notre étude, nous avons utilisé trois logiciels différents, WinGLink de Geosystems, SITEM-SEMDI de la compagnie Aarhus Geophysics et IX1D de la compagnie Interpex. Les logiciels qui permettent le plus de

flexibilité et qui donnent des informations sur les incertitudes des paramètres sont SITEM-SEMDI et IX1D.

La fréquence des mesures de suivi par sondage TEM est difficile à déterminer à l'avance. Pour l'établir il faudrait avoir une estimation de la variation anticipée de l'interface ED-ES. Celle-ci pourrait être obtenue par modélisation hydrogéologique en établissant divers scénarios de précipitations et de débit d'eau pompé. Cette modélisation devrait s'appuyer sur une distribution des conductivités hydrauliques qui est relativement mal connue (voir travaux du Groupe Madelin'Eau, 2004). Comme cette interface sera surveillée par les jeux de sondes multiparamétriques installés dans les puits de suivi implantés, l'étude des variations enregistrées au cours du temps servira de référence pour établir à moyen et long terme la fréquence des mesures TEM. Dans un premier temps, avant d'obtenir cet historique, on recommande de répéter les mesures TEM tous les deux ans dans les premières années du suivi. Cette période pendant laquelle les mesures de suivi en puits et en surface par TEM auront lieu permettra de calibrer les méthodes et de vérifier les corrélations.

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les sondages TEM ont permis de déterminer la profondeur et l'élévation de la nappe salée associée à une résistivité de la formation d'environ 3 Ω .m. Au-dessus les formations de grès rouge aquifère ont des résistivités de l'ordre de 40 à 50 Ω .m, qui traduit une eau de bonne qualité à environ 8-10 Ω .m. Les simulations numériques ont montré que s'il est difficile de déterminer la zone de mélange au niveau de l'interface ED-ES, par contre la profondeur à la nappe salée est bien déterminée dans tous les cas. C'est cette profondeur qui a été évaluée pour tous les sondages TEM. Les cartes d'élévation à la nappe salée ont été établies pour chaque île visitée (Have-Aubert, Centrale, Havre-Aux Maisons, Grosse-Île et Grande-Entrée). Ces estimés ont été comparés à ceux obtenus à partir de la relation de Ghyben-Herzberg. Pour les secteurs de Havre-Aubert, Étang-du-Nord, Grande-Entrée, Fatima (ouest et est), les résultats concordent et le degré de confiance est élevé dans les élévations obtenues. Pour les secteurs de Fatima (centre) et d'Havre-Aux-Maisons, les estimés par les deux approches ne sont pas cohérents. Plusieurs raisons peuvent être avancées mais l'origine géologique (faille par exemple) pourrait expliquer les estimés obtenus par sondage TEM; des effets latéraux (interférence avec des clôtures ou autres infrastructures superficielles conductrices) ne sont pas à écarter. On recommande de vérifier l'origine de ces zones conductrices par forage.

Les secteurs d'Havre-Aubert et de Grosse-Île ne sont pas vulnérables au changement de l'élévation de la nappe salée. Par contre, les secteurs de Grande-Entrée, Étang-du-Nord-est et de Fatima-est sont plus vulnérables car la nappe est actuellement à une élévation relativement faible sous la zone des puits en exploitation. Ce sont ces secteurs qui devraient faire l'objet d'un suivi temporel. Pour cela, on recommande de réaliser des forages traversant l'interface ED-ES inférée, ce qui permettrait (1) de valider les interprétations, (2) de faire des levés de diagraphie EM pour bien caractériser l'interface et la zone de mélange associée, (3) d'installer des sondes multiparamétriques pour mesurer la conductivité électrique, la température et la pression en mode continu, et (4) de localiser des sites de sondage TEM à proximité qui serviront au suivi de la nappe.

Une source de données importantes, les données de niveau statique et de conductivité électrique mesurées en continu dans les nouveaux puits de 2009, n'est pas utilisable à l'heure actuelle car les mesures ne sont pas calibrées. Lorsque ces données auront été corrigées suite à une calibration, il serait important de les ajouter à l'ensemble des résultats obtenus afin de déterminer le profil de porosité le long des puits, et par la relation de Ghyben-Herzberg, d'estimer l'élévation à l'interface ED-ES ainsi que sa variation dans le temps. Un autre travail est en cours, celui des mesures expérimentales sur les carottes de forage. L'établissement d'une relation entre la résistivité de l'eau (et donc sa concentration en sels) et la résistivité de la formation de grés saturée obtenue par ce travail permettra d'interpréter avec plus de résolution les sondages EM ainsi que les variations de conductivités mesurées par les sondes.

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.

Chouteau, M. et Intissar, R., 2010. *Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine Phase 1: Caractérisation électrique des aquifères*; Rapport Final pour le MDDEP, École Polytechnique, Montréal, 30 juin 2010, 92 p.

Comte, J-C., 2004. *Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements denses 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.

Corridor Resources, 2000: Well History Report, Fatima #1, Cap-Aux-Meules, Magdalen Islands, Québec, March 15, 2000.

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

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

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

Madelin'Eau, 2004 : Île de La Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine, Québec: Évaluation de la capacité support des ressources en eau souterraine pour fins d'alimentation en eau potable; Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 40 p.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Madelin'Eau, 2004. *Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable*, Rapport final, Document No 1, Méthodologie de l'étude, 60 p.

Madelin'Eau, 2004. *Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable*, Rapport final, Document No 2, Partie A : secteur de l'Étang-du-Nord – Cap-aux-Meules; Partie B : secteur de Fatima, 113 p.

Madelin'Eau, 2004. *Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable*, Rapport final, Document No 3 (Secteurs hors Île de Cap-aux-Meules), 153 p.

Madelin'Eau (2009) : Secteur de Grande-Entrée – Flanc Nord Alimentation en eau potable; Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines ; Puits de production GE-09-01A, GE-09-02, GE-09-03, GE-09-04 et GE-09-05; Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Québec, 31 juillet 2009.

Madelin'Eau (2010) : Secteur de l'Étang-du-Nord (regroupement no. 1), Alimentation en eau potable Puits EDN-09-01PP, EDN-09-02PP, EDN-09-03PP et EDN-09-04PP; Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES. Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique; Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Québec, Mai 2010.

Madelin'Eau (2010) : Secteur de Fatima (regroupement no. 2), Alimentation en eau potable Puits FAT-09-01PP, FAT -09-02PP, FAT -09-03PP et FAT -09-04PP; Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES. Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique; Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Québec, Mai 2010.

Madelin'Eau (2010) : Secteur de Havre-aux-Maisons (regroupement no. 3), Alimentation en eau potable Puits HAM-09-01PP et HAM-09-02PP; Demande d'autorisation en vertu de

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

l'article 31 du RCES. Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique; Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Québec, Mai 2010.

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*. 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 1 : précision de l'altitude des stations TEM

Pour déterminer l'exactitude de nos estimations d'altitude des sondages TEM à l'aide d'un modèle numérique de terrain (application API de Google), nous avons comparé les altitudes obtenues par ce modèle aux puits existants par rapport aux valeurs obtenues par arpentage de précision (DGPS précis à 4 cm près). L'estimation des différences moyennes et médianes sont résumées dans les tableaux A2.1, A2.2, A2.3 ci-dessous.

Tableau A1.1 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits EDN, HAM, FAT et GE (15 puits).

erreur sur élévation EDN, FAT, HAM et GE				
moyenne	médiane	Max	min	n (mesures)
3.024003113	2.68704	7.477912	0.422997	15

Tableau A1.2 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits EDN (4 puits).

erreur sur élévation EDN				
moyenne	médiane	max	min	n
2.17833255	2.305071	3.146656	0.956533	4

Tableau A1.3 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits FAT (4 puits).

erreur sur élévation FAT				
moyenne	médiane	max	min	n
2.854292625	3.170978	4.652219	0.422997	4

Tableau A1.4 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits HAM (2 puits).

erreur sur élévation HAM				
moyenne	Médiane	max	min	n
4.0285202	4.02852	5.37	2.68704	2

Tableau A1.5 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits GE (5 puits).

erreur sur élévation GE				
moyenne	médiane	max	min	n
3.43450112	1.59207	7.477912	0.863199	5

Tableau A1.6 : Erreurs calculées à partir des élévations des puits P et PU (17 puits)

erreur sur élévation CAM				
moyenne	Médiane	max	min	n
2.443944872	2.040213	4.834335	0.302595	17

Remarque : Comme la hauteur du tubage hors-sol n'est pas connue pour les puits P et PU, les erreurs sur l'élévation des puits P et PU n'ont pas été utilisées avec ceux d'EDN, HAM,

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

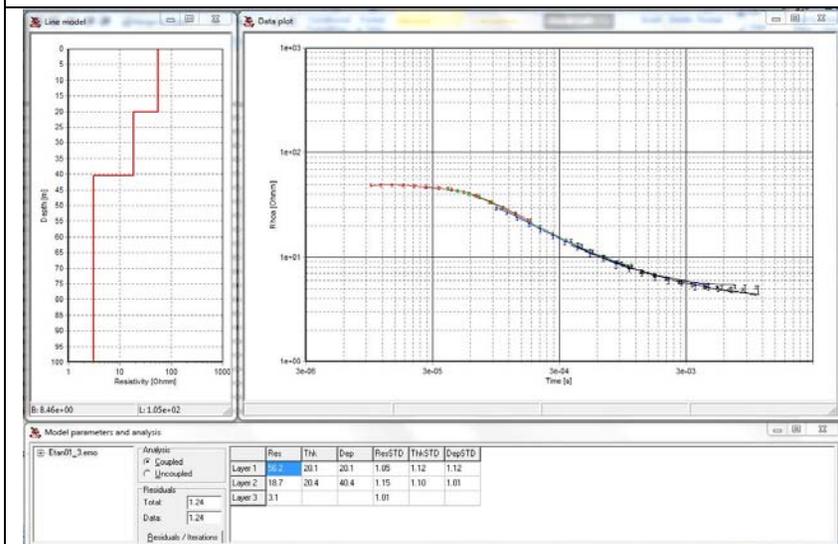
FAT et GE. Pour le calcul de l'erreur sur l'élévation, une hauteur du tubage de 1m a été utilisée pour l'ensemble des puits P et PU.

Annexe 2 : sondages TEM avec interprétation

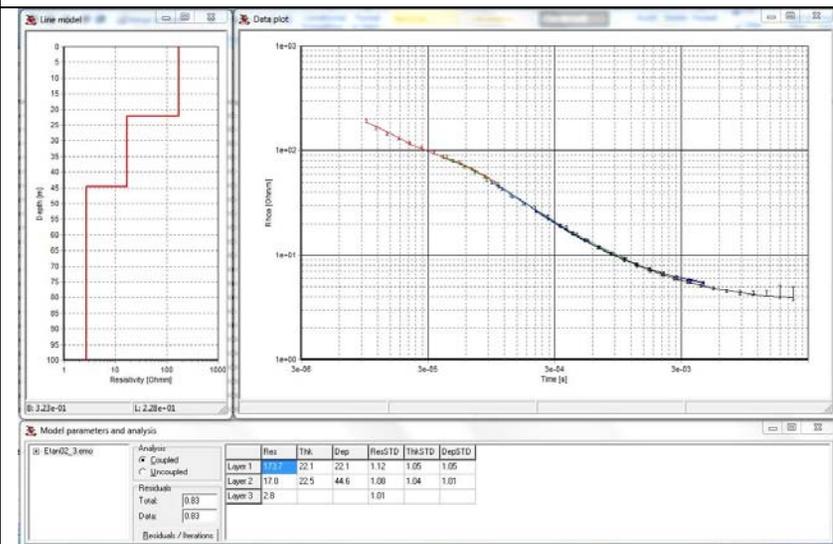
Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

1- Étang-du-Nord

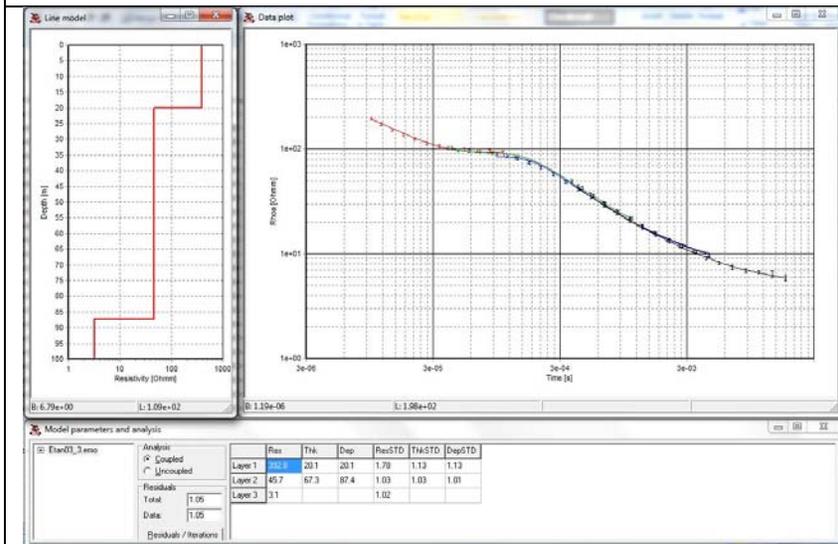
Etan 01



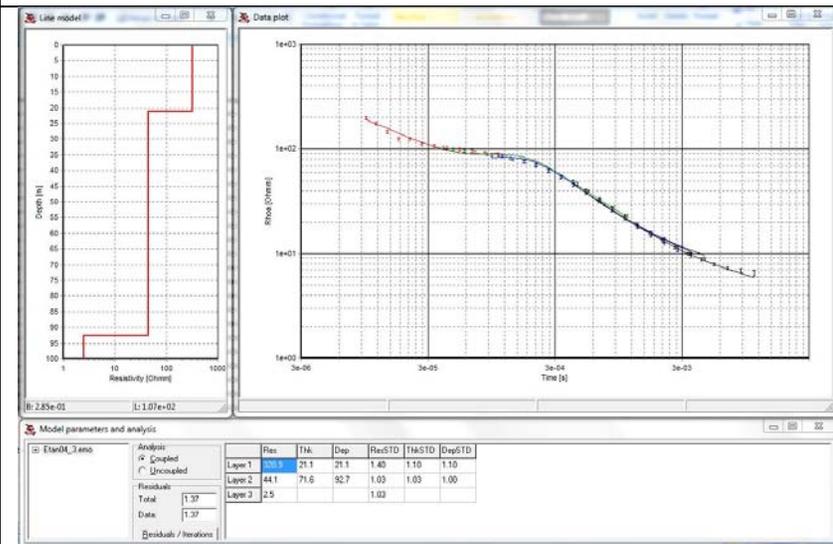
Etan 02



Etan 03

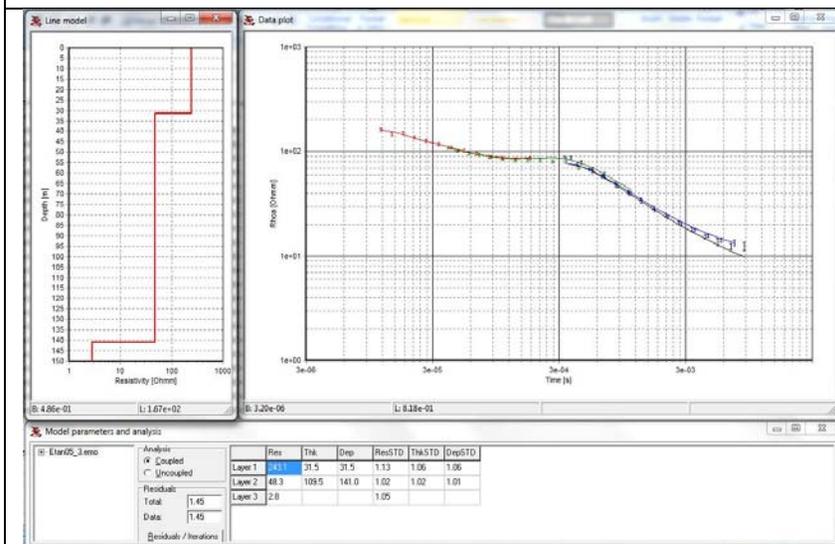


Etan 04

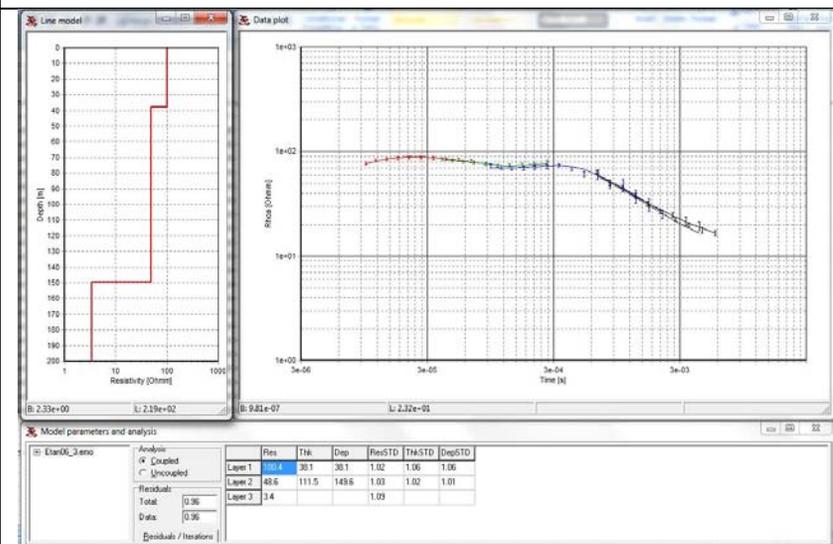


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

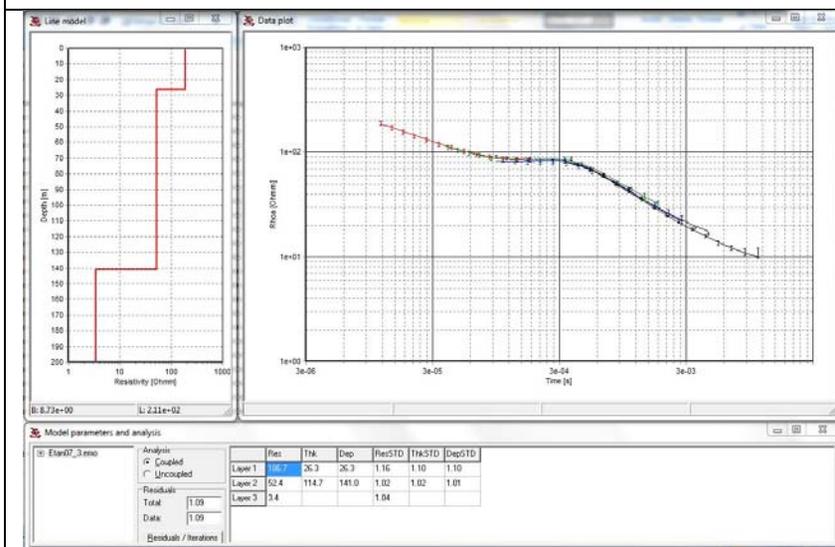
Etan 05



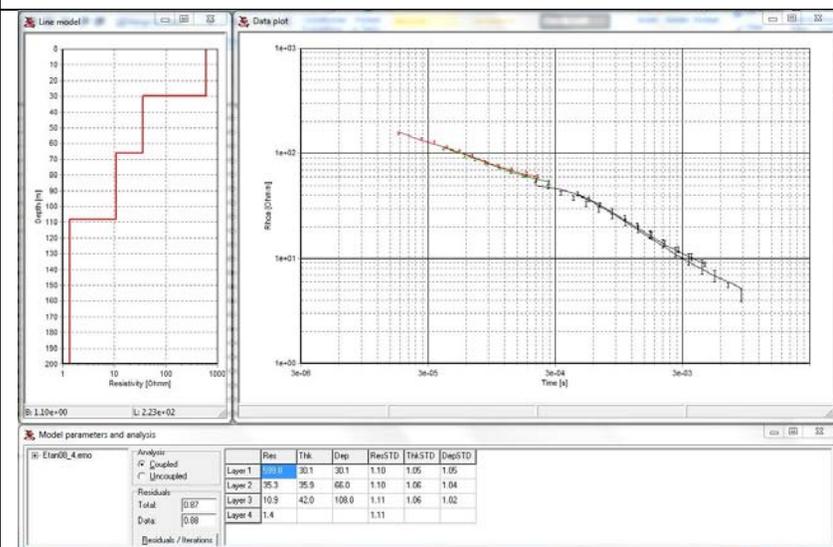
Etan 06



Etan 07

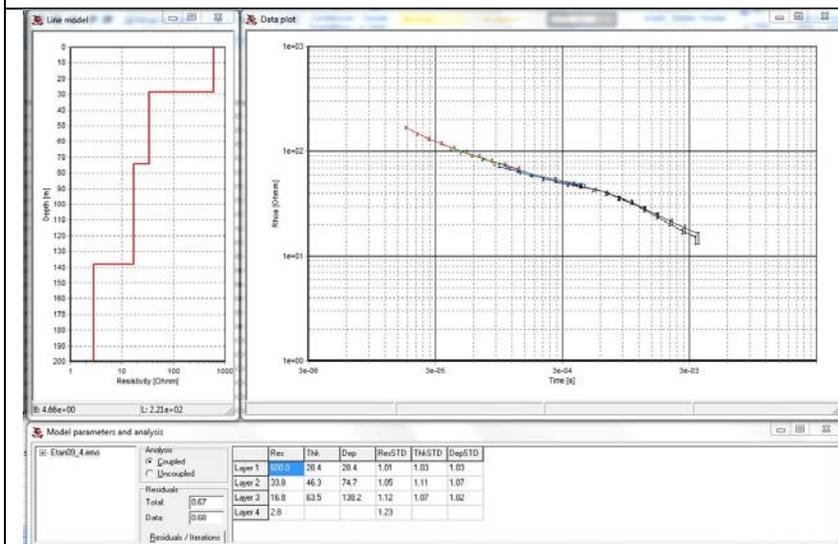


Etan 08

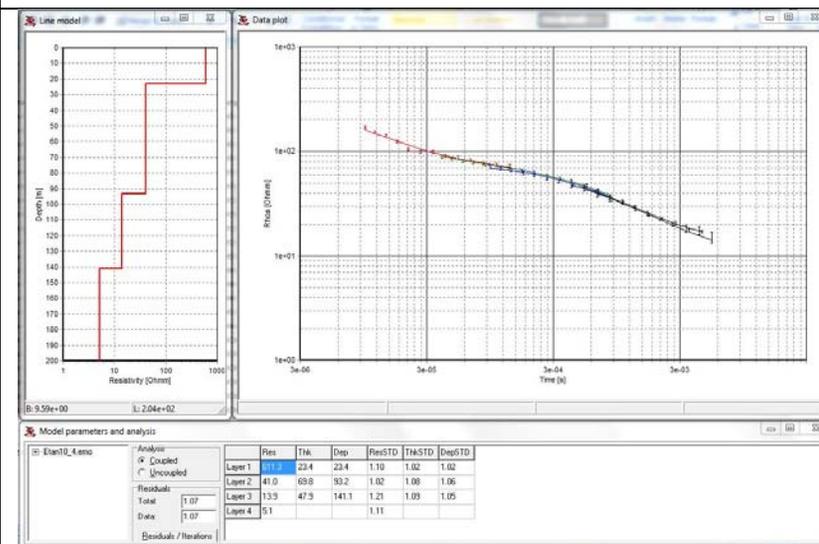


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

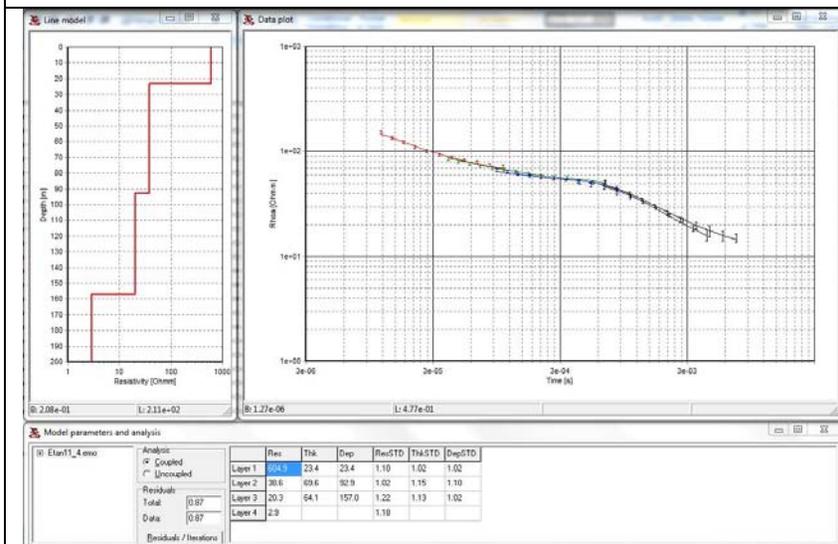
Etan 09



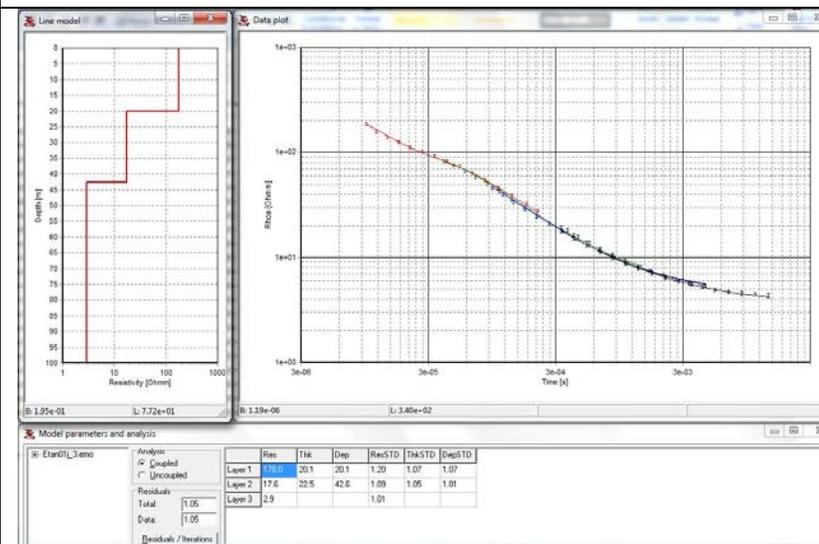
Etan 10



Etan 11

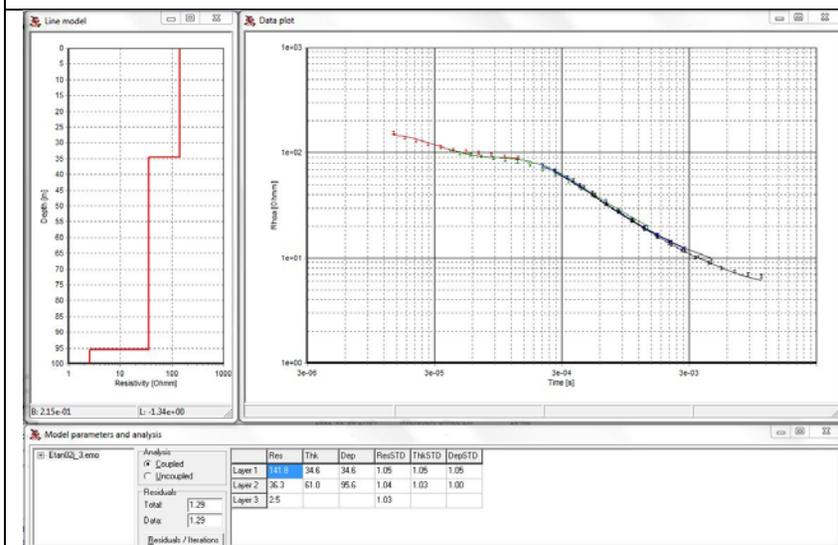


Etan 12

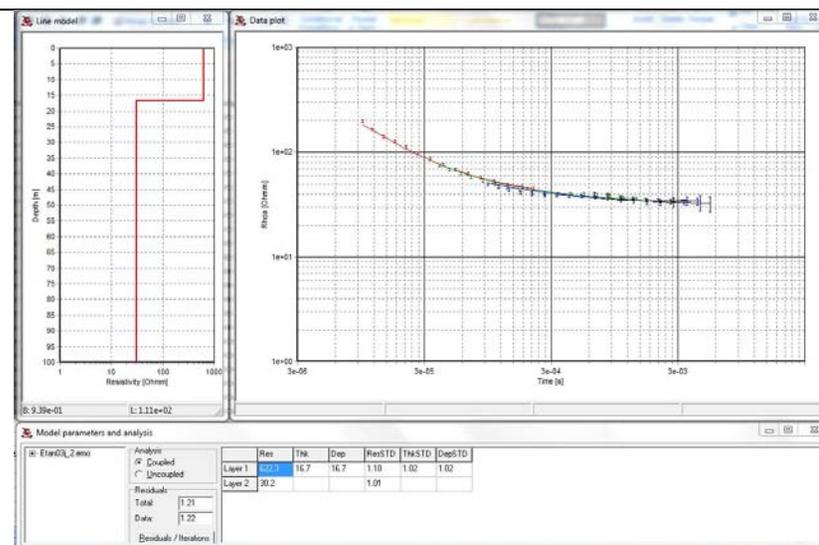


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

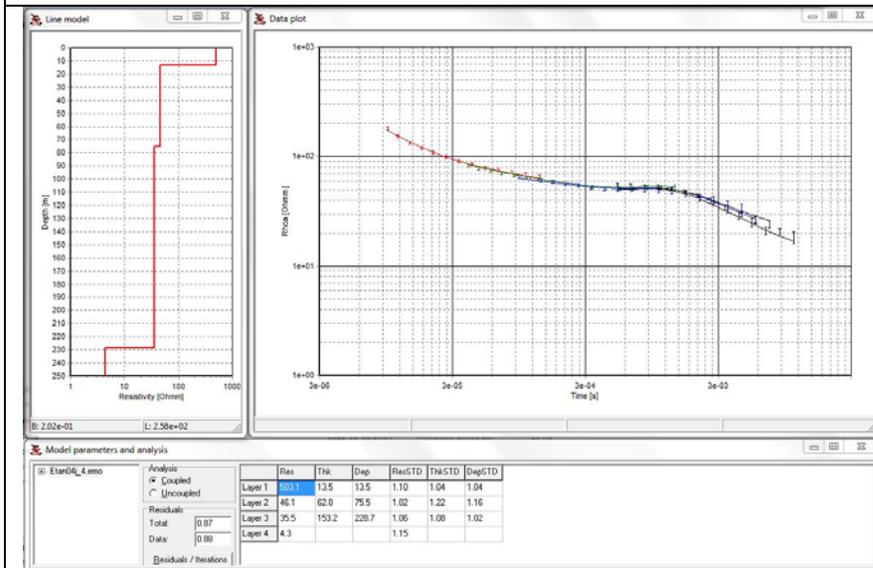
Etan 13



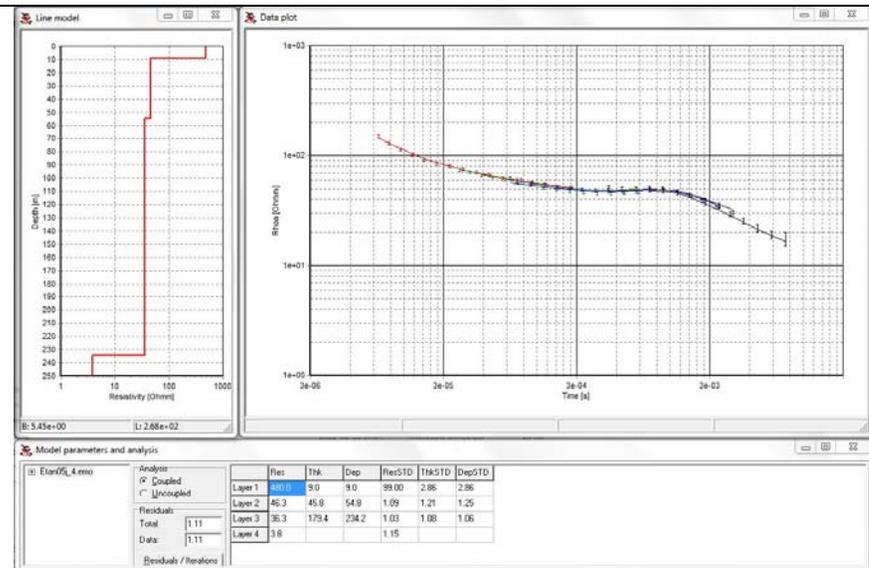
Etan 14



Etan 15

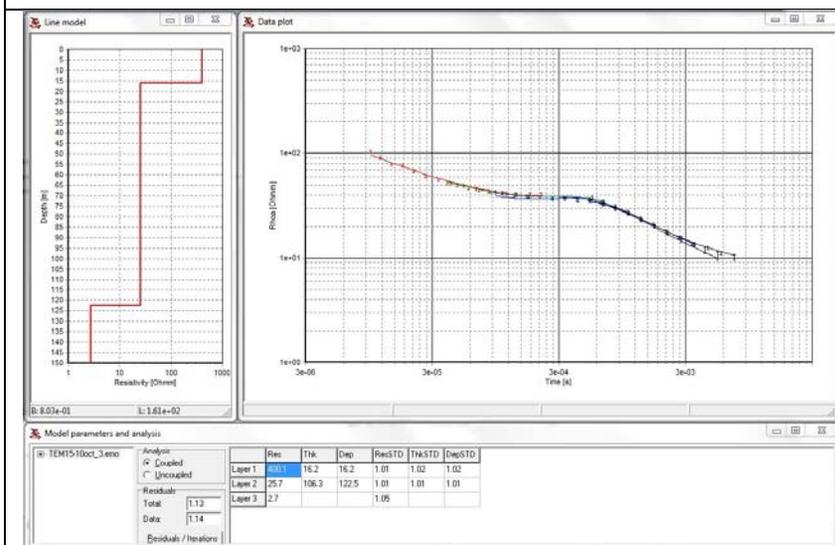


Etan 16

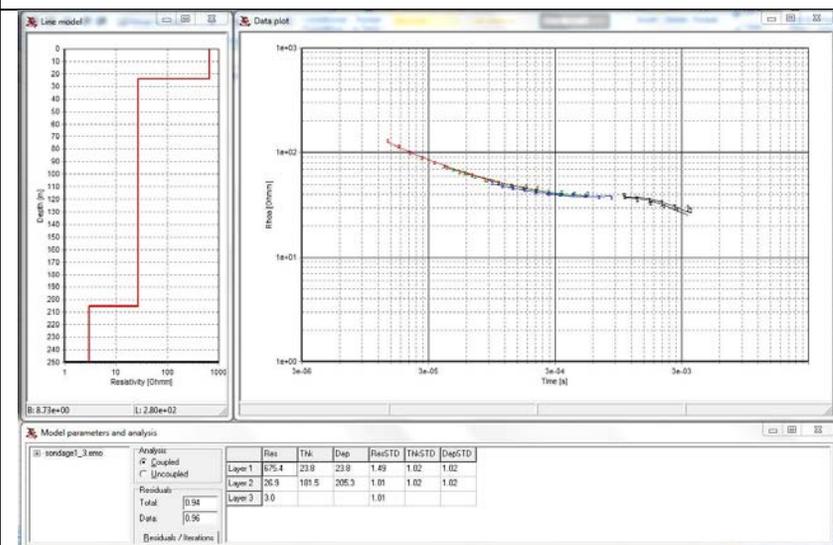


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

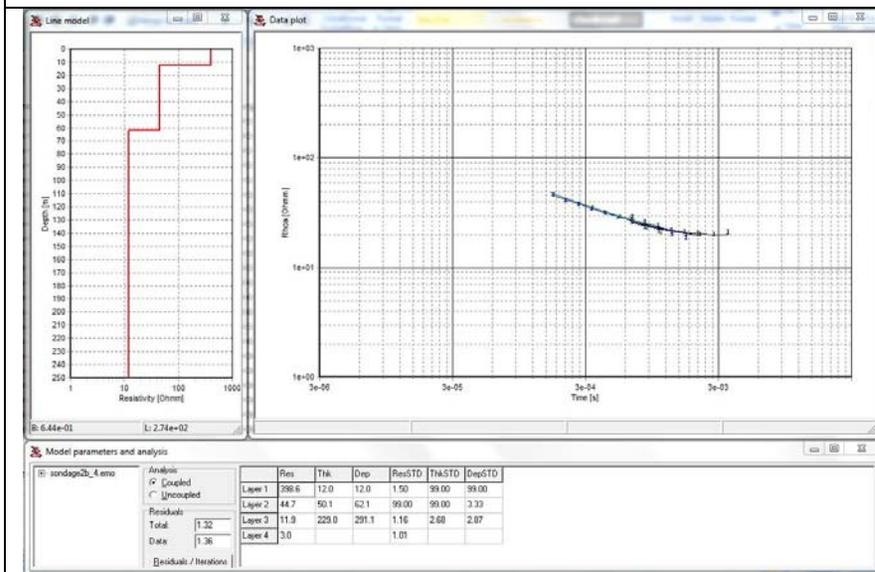
Etan 17



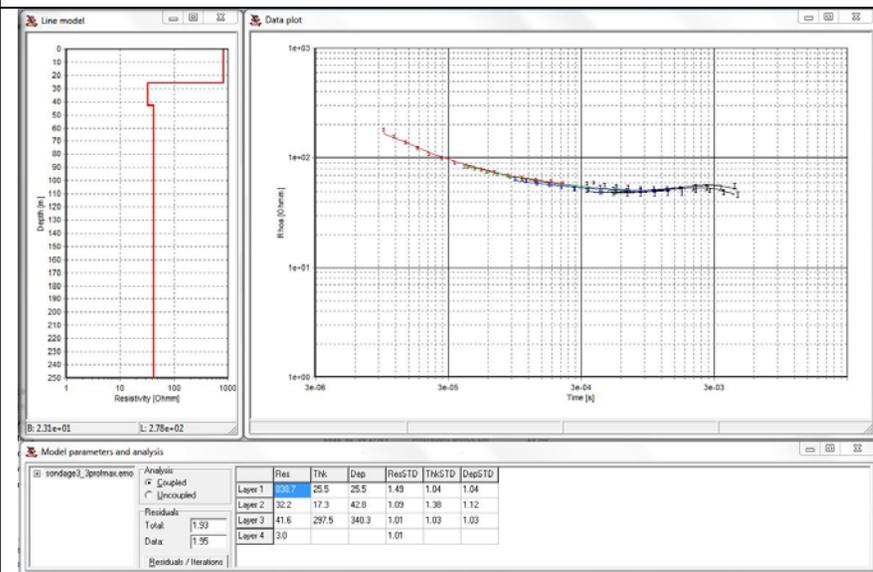
Etan 18



Etan 19

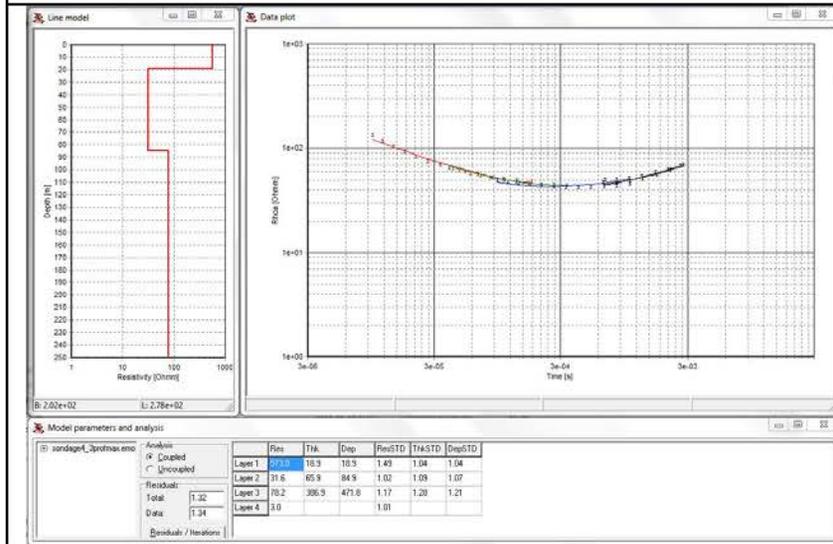


Etan 20

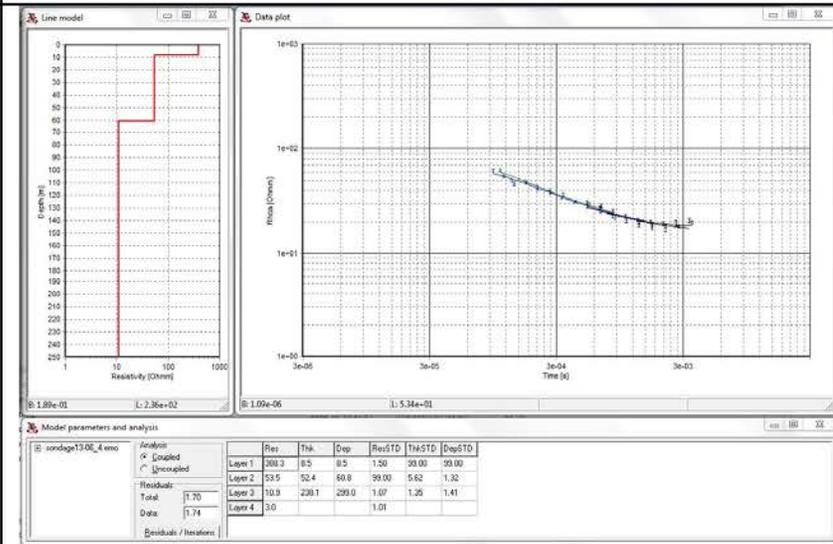


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Etan 21

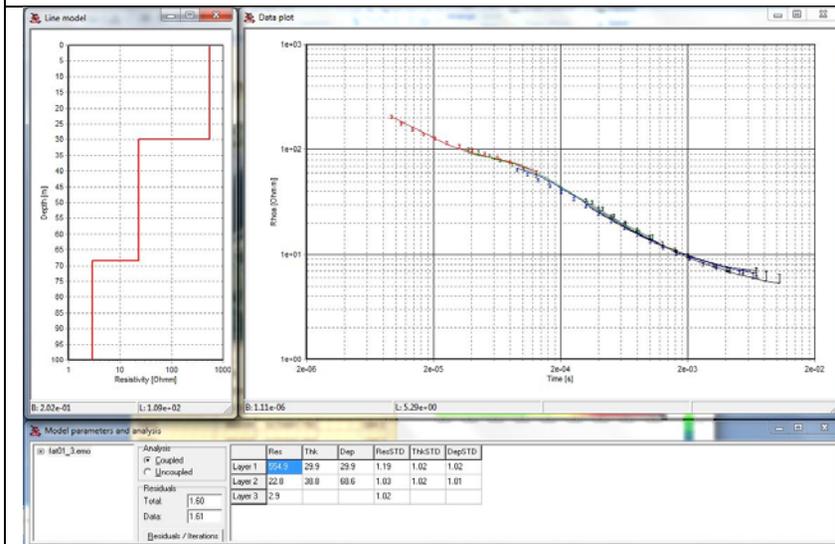


Etan 22

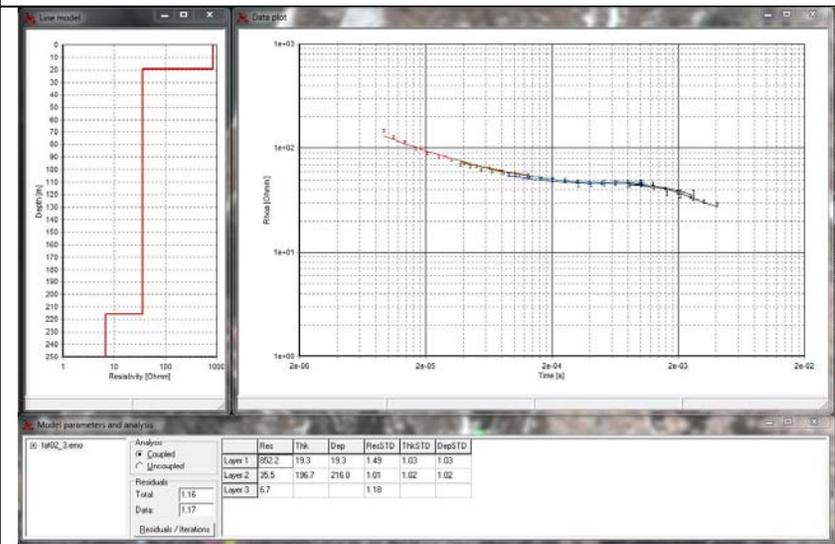


2- Fatima

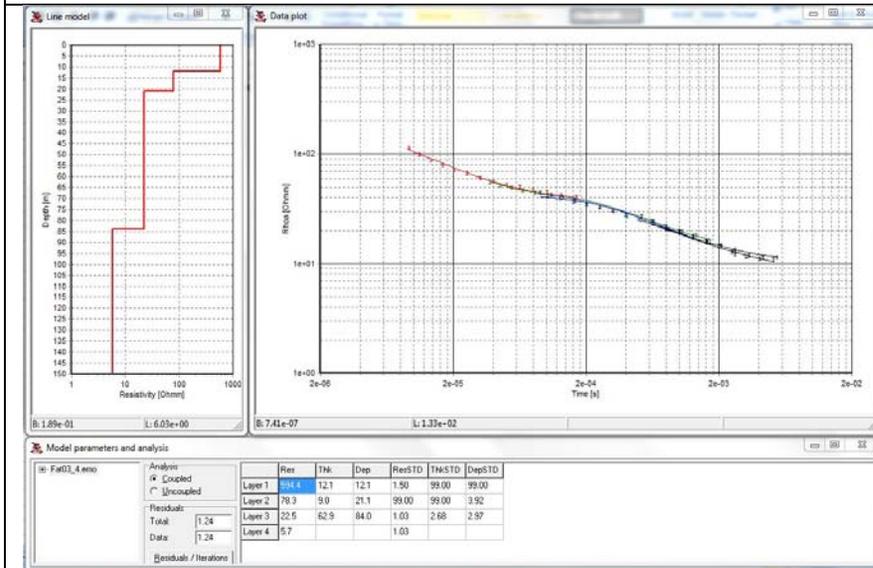
Fat 01



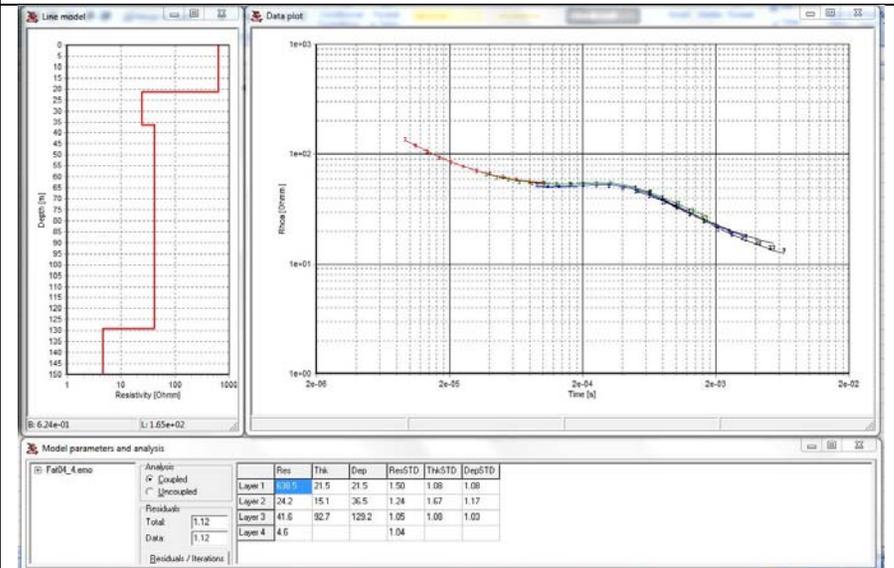
Fat 02



Fat 03

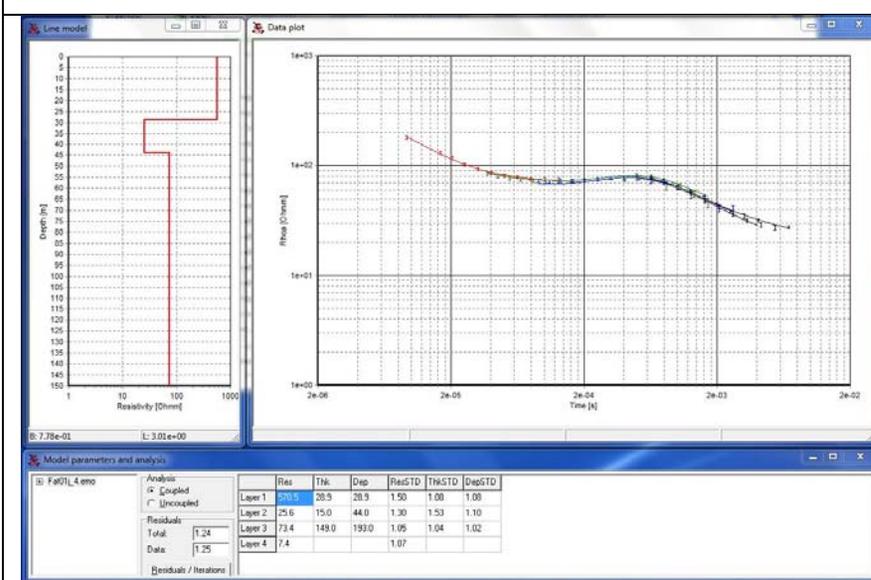


Fat 04

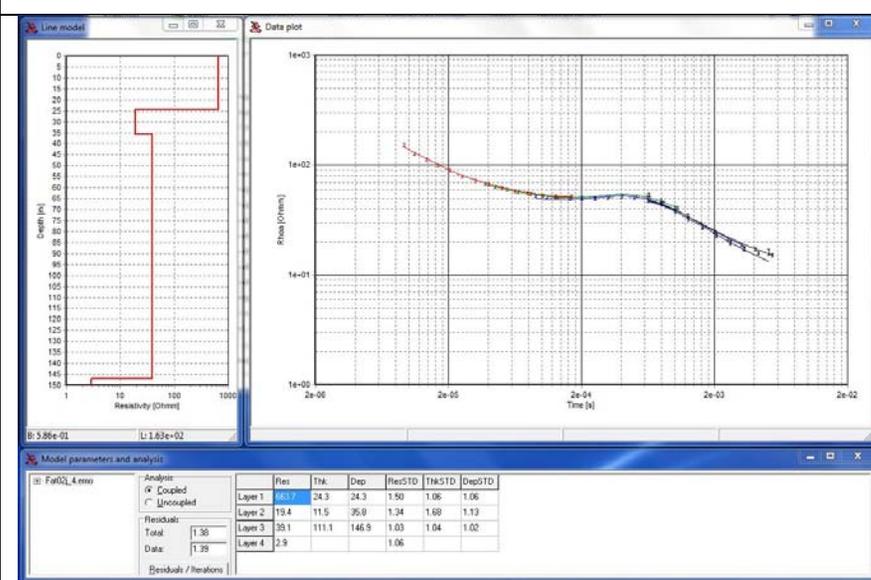


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

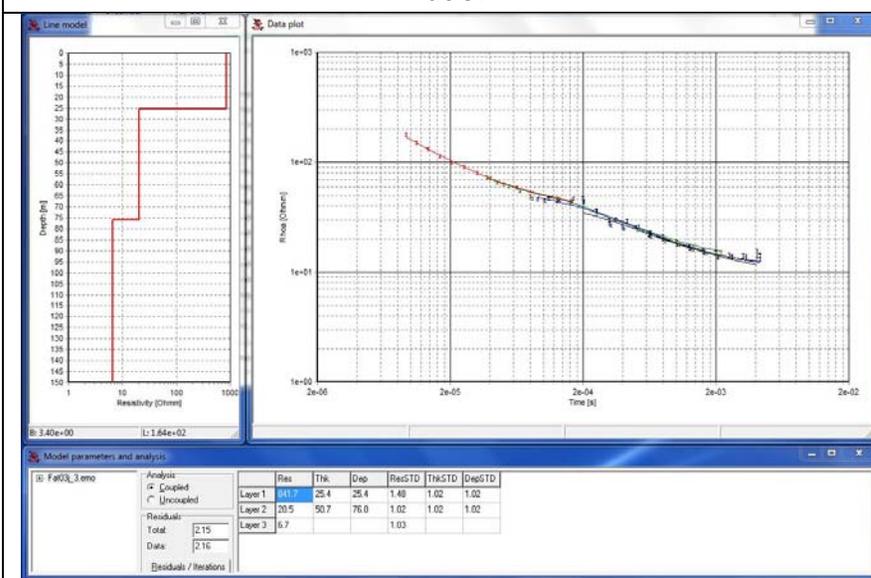
Fat 05



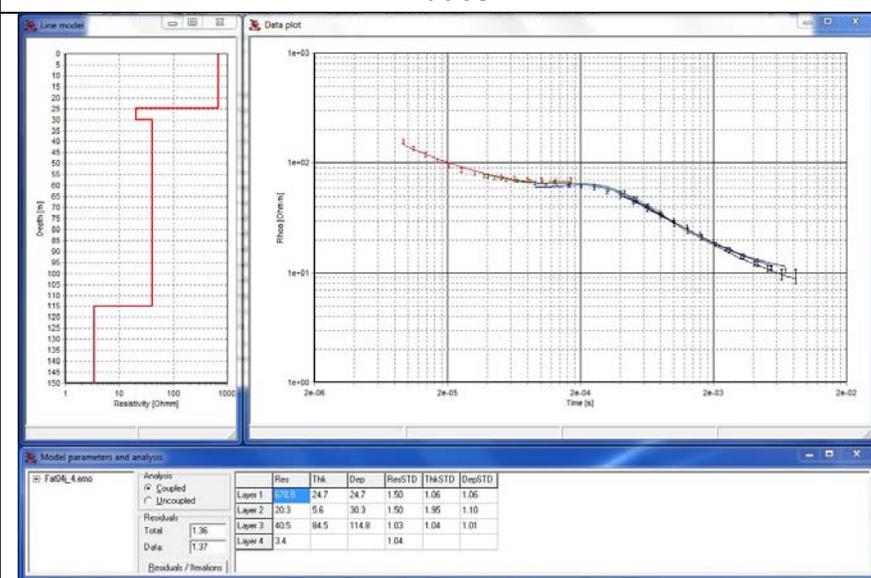
Fat 06



Fat 07

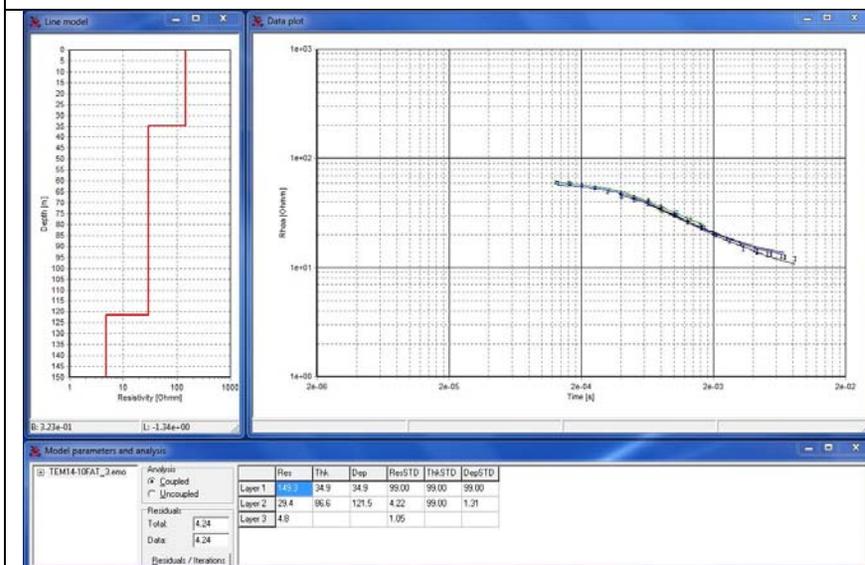


Fat 08

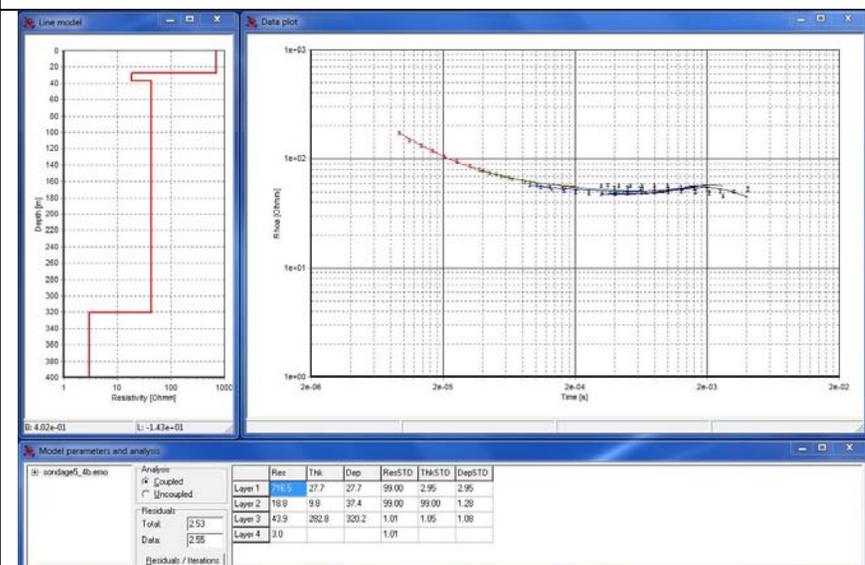


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

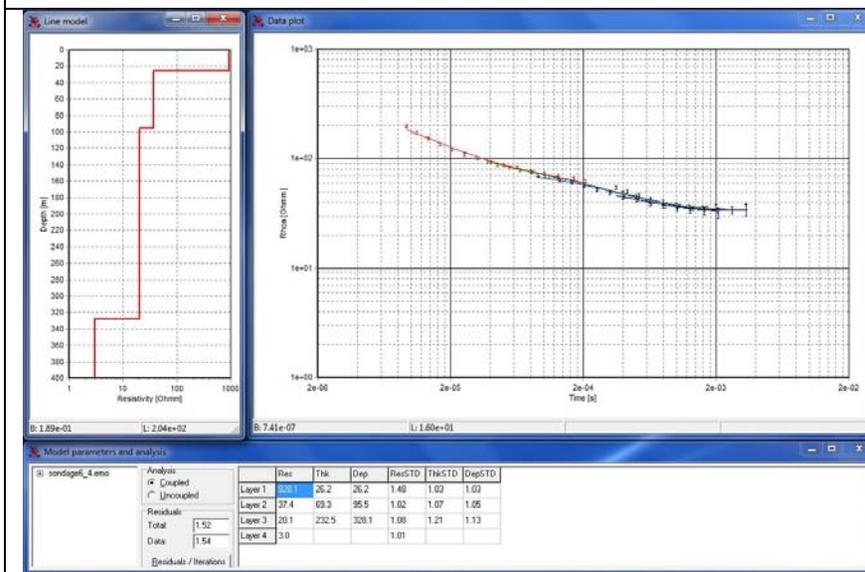
Fat 09



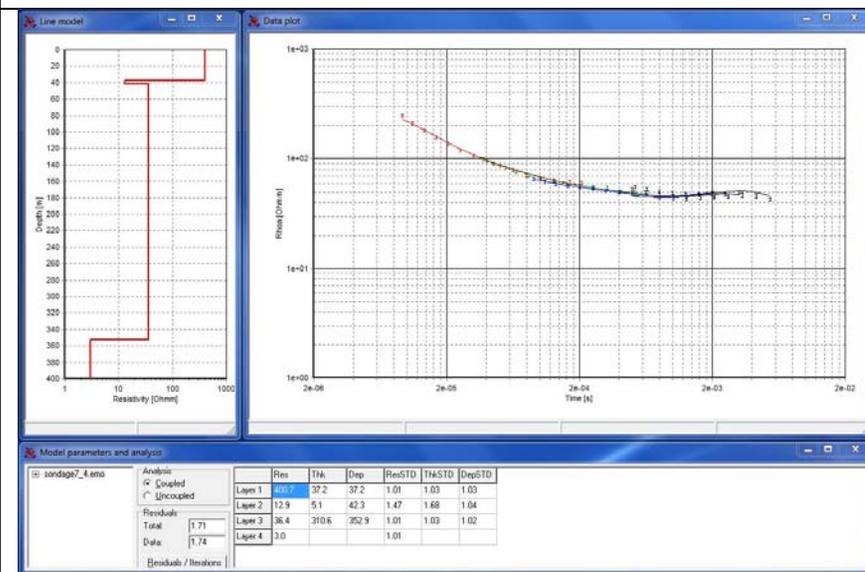
Fat 10



Fat 11

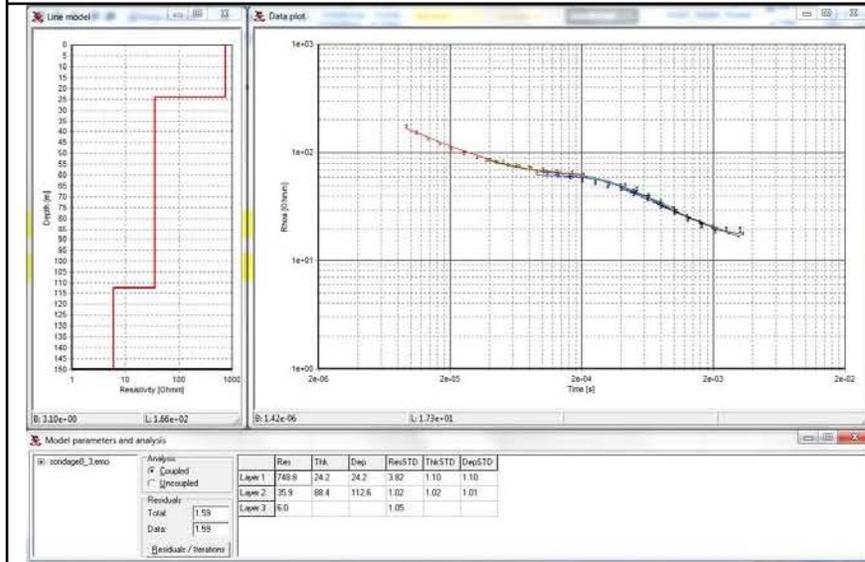


Fat 12



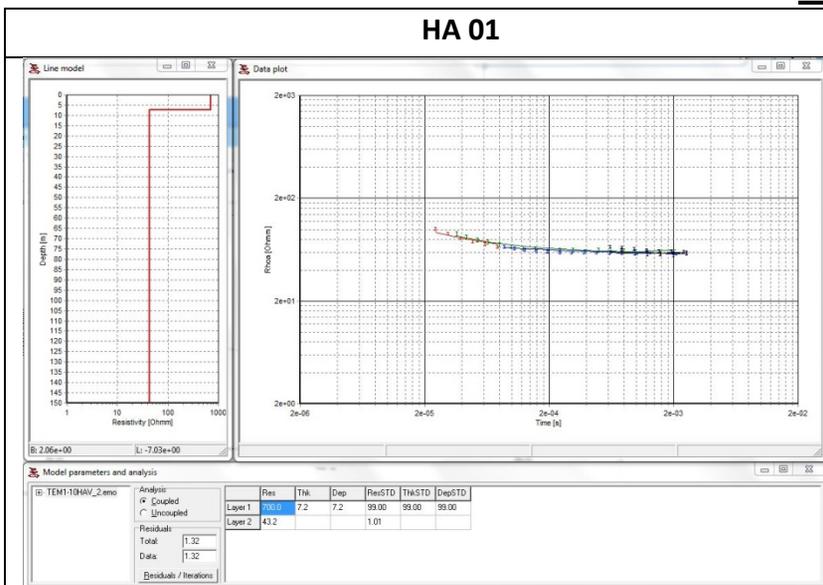
Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Fat 13

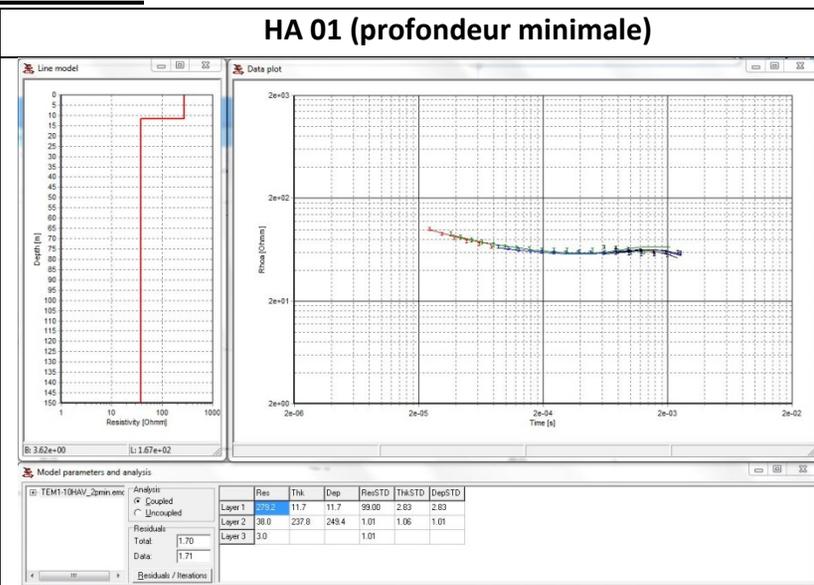


3- Havre-Aubert

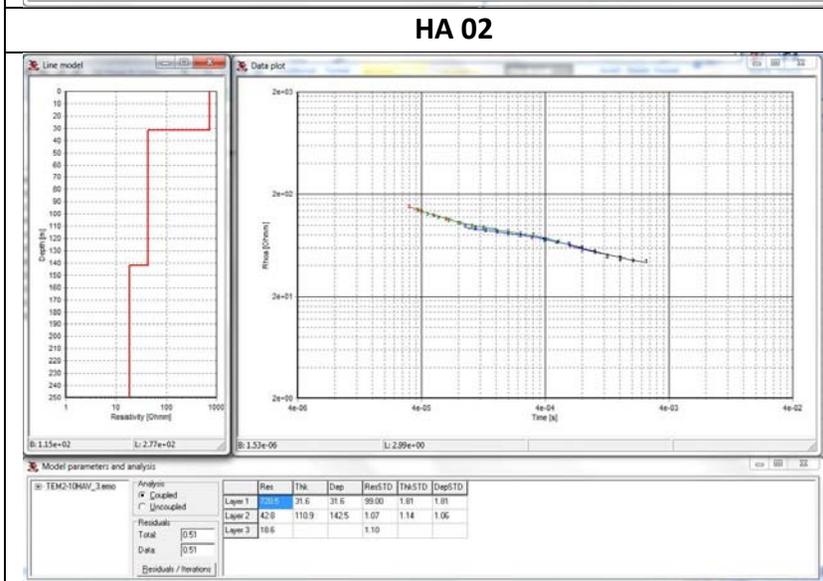
HA 01



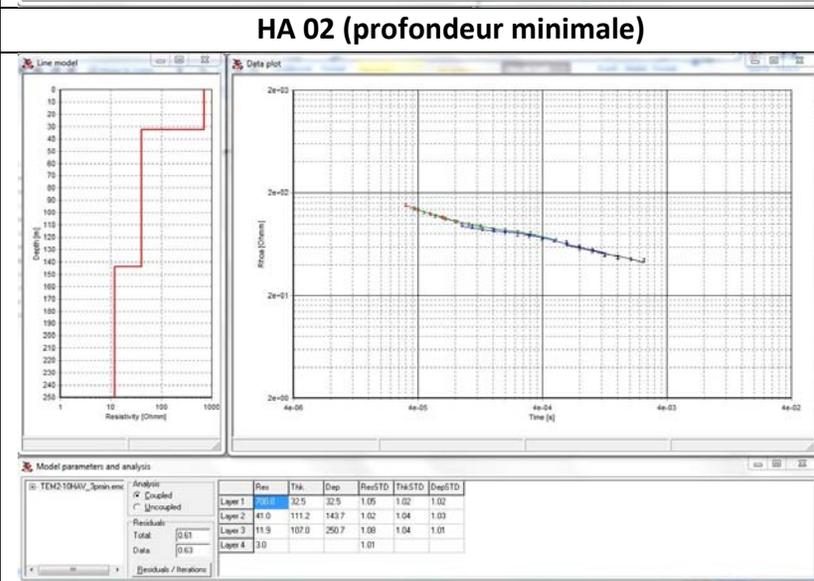
HA 01 (profondeur minimale)



HA 02

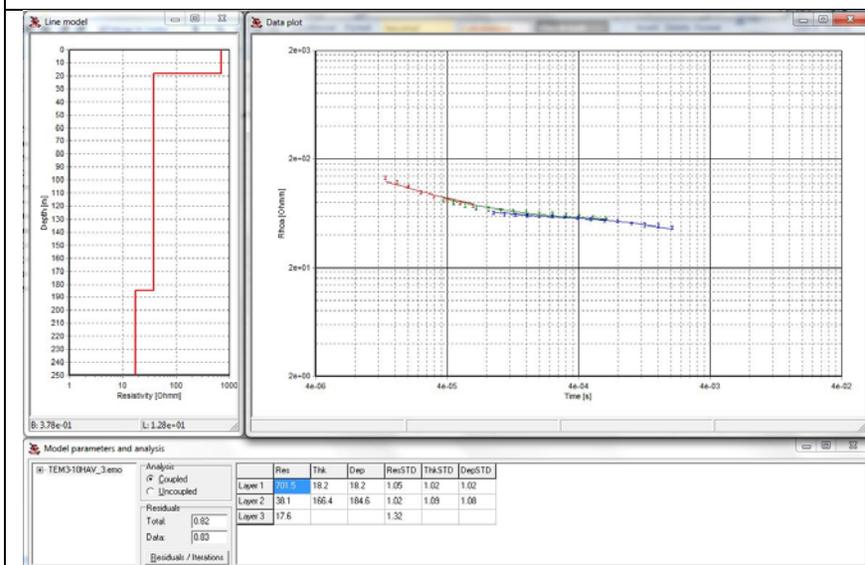


HA 02 (profondeur minimale)

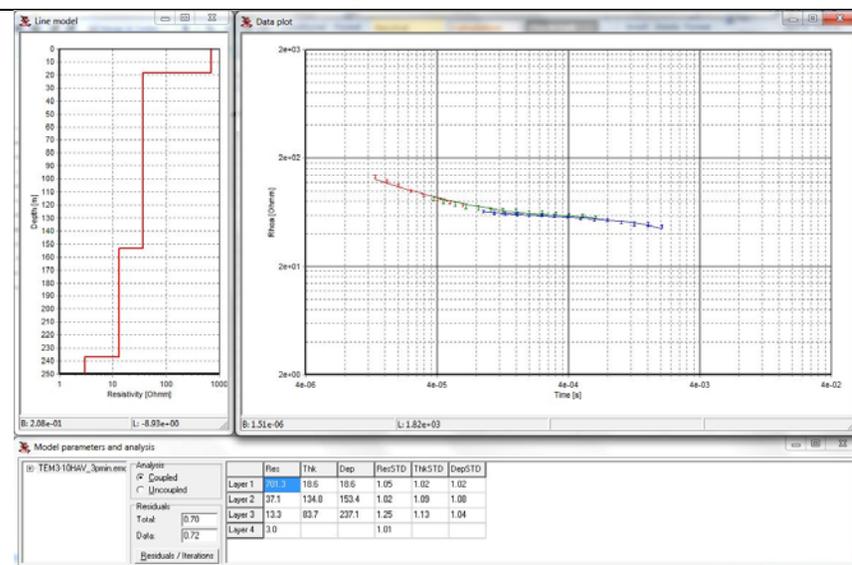


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

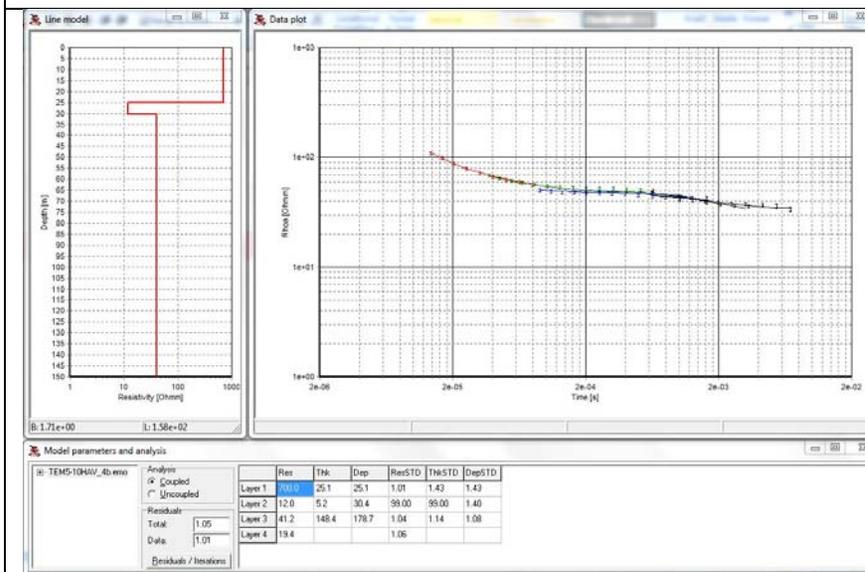
HA 03



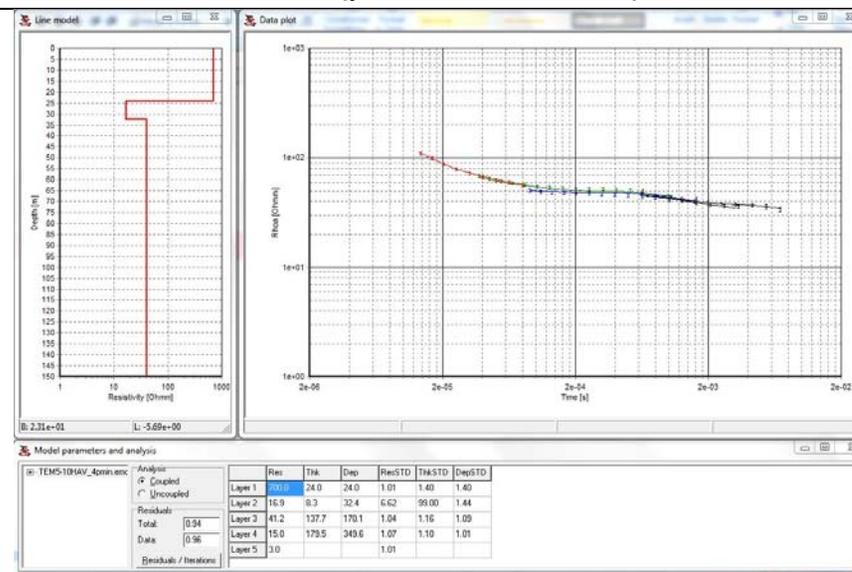
HA 03 (profondeur minimale)



HA 04

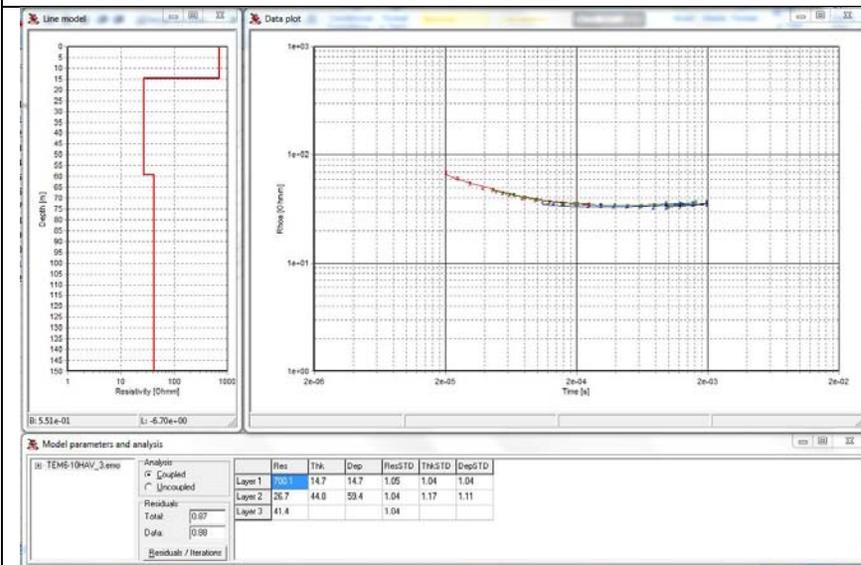


HA 04 (profondeur minimale)

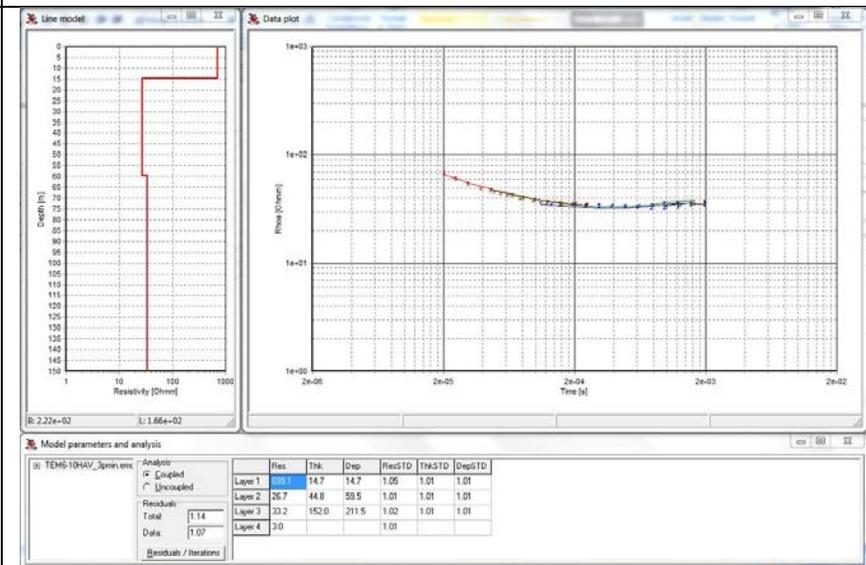


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

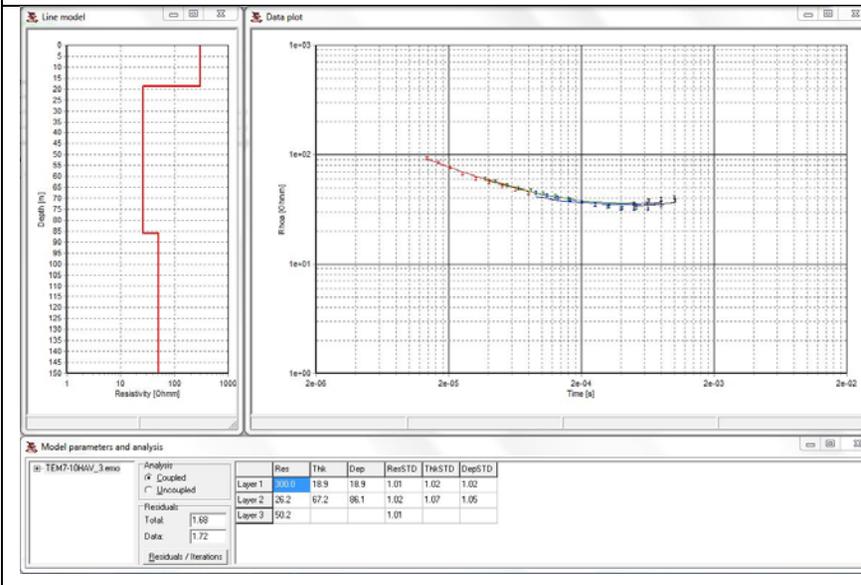
HA 05



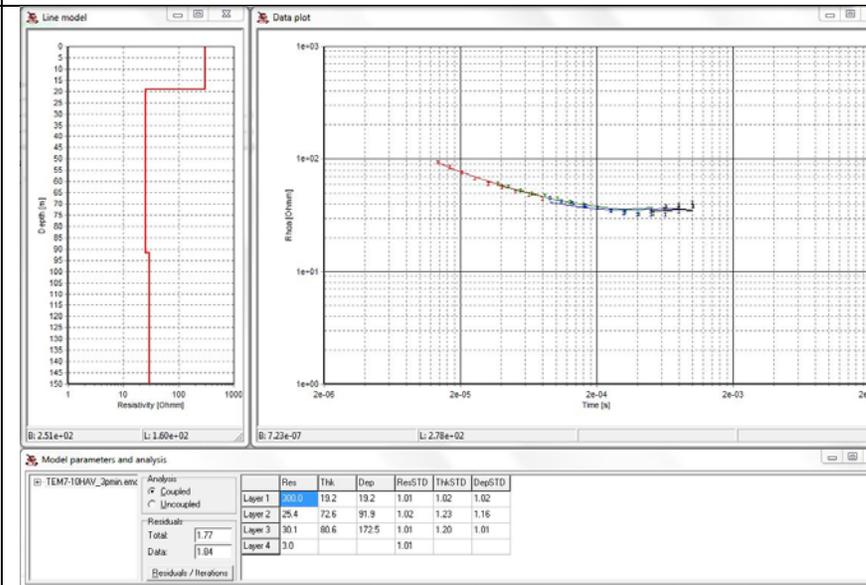
HA 05 (profondeur minimale)



HA 06

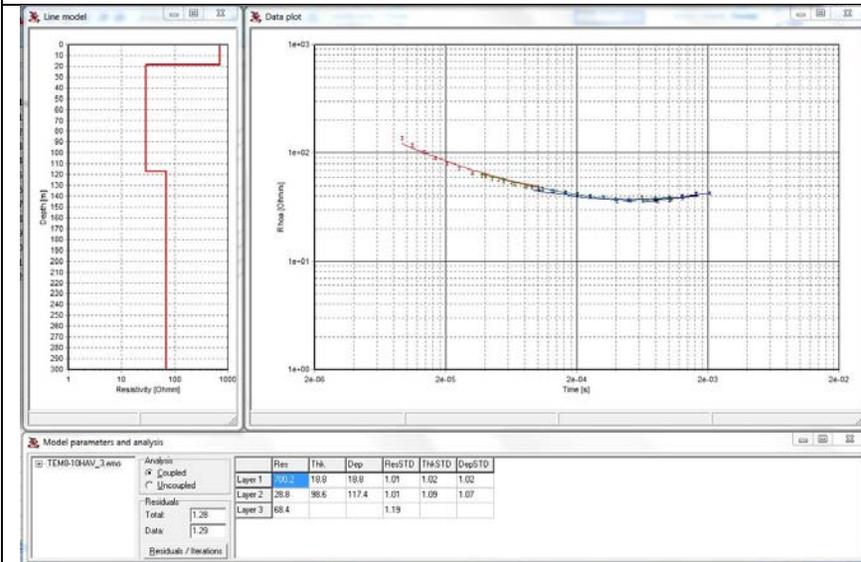


HA 06 (profondeur minimale)

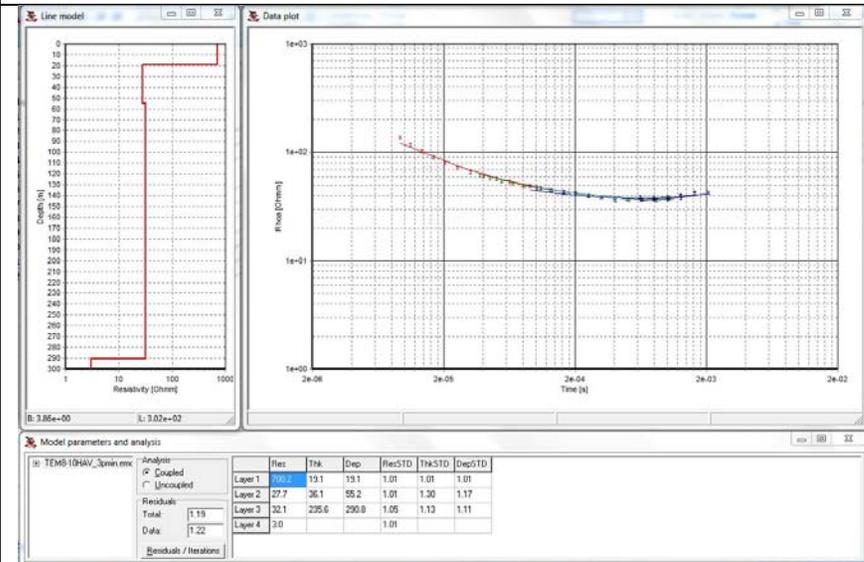


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

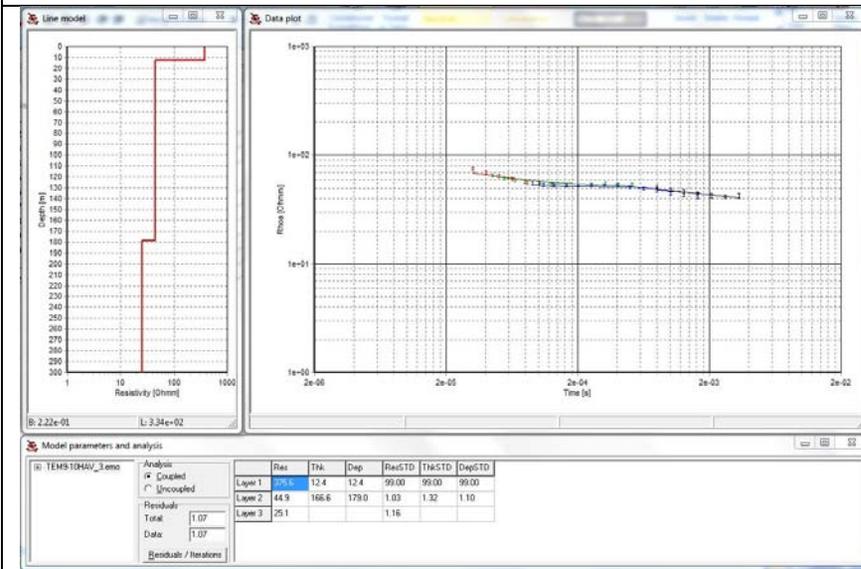
HA 07



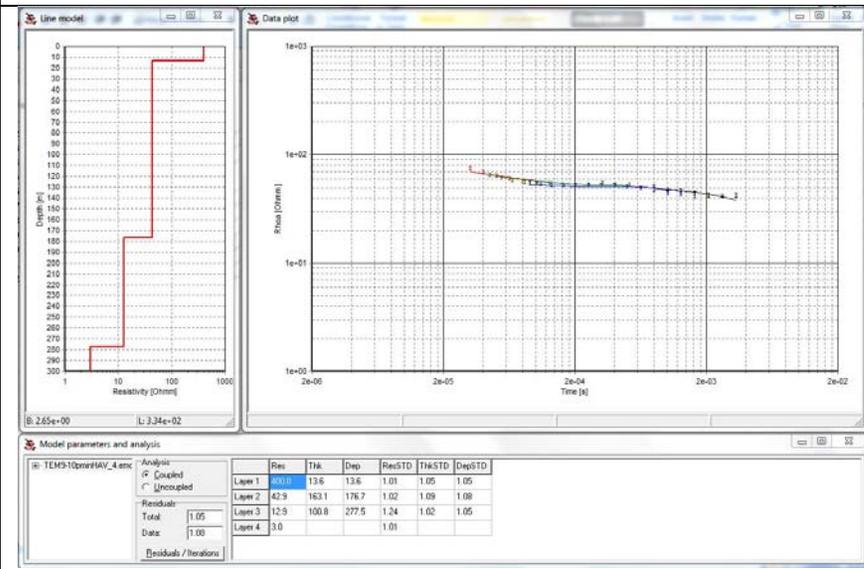
HA 07 (profondeur minimale)



HA 08

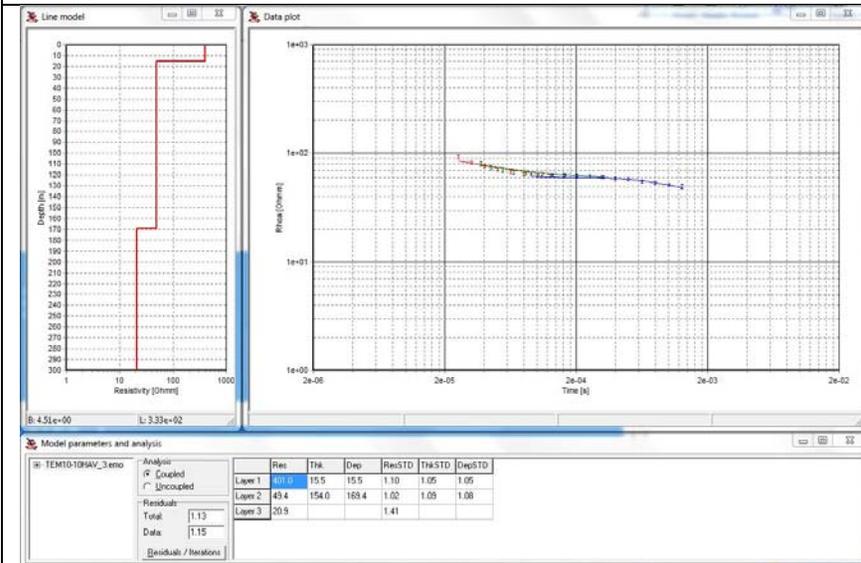


HA 08 (profondeur minimale)

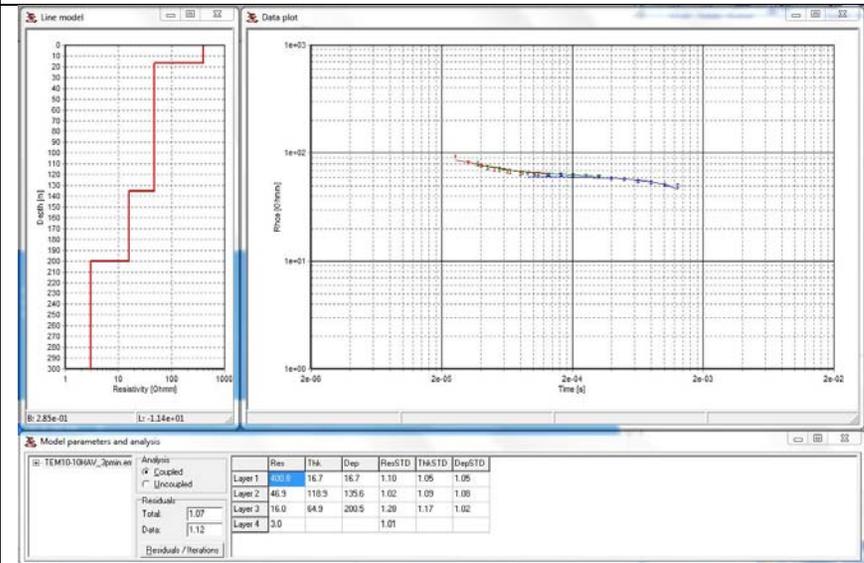


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

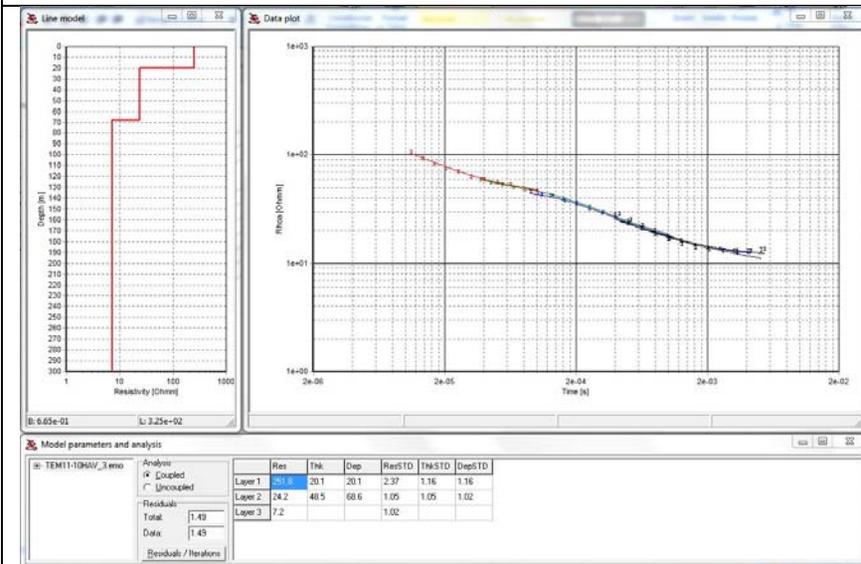
HA 09



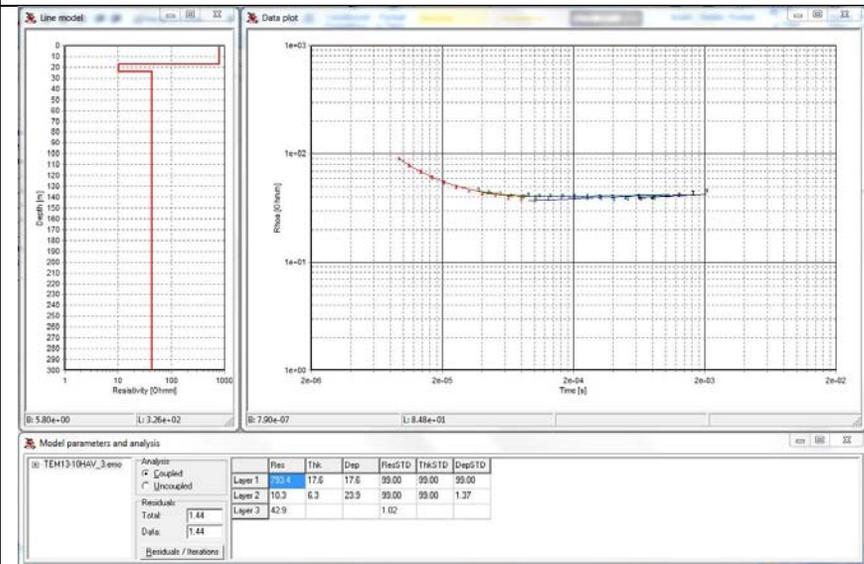
HA 09 (profondeur minimale)



HA 10

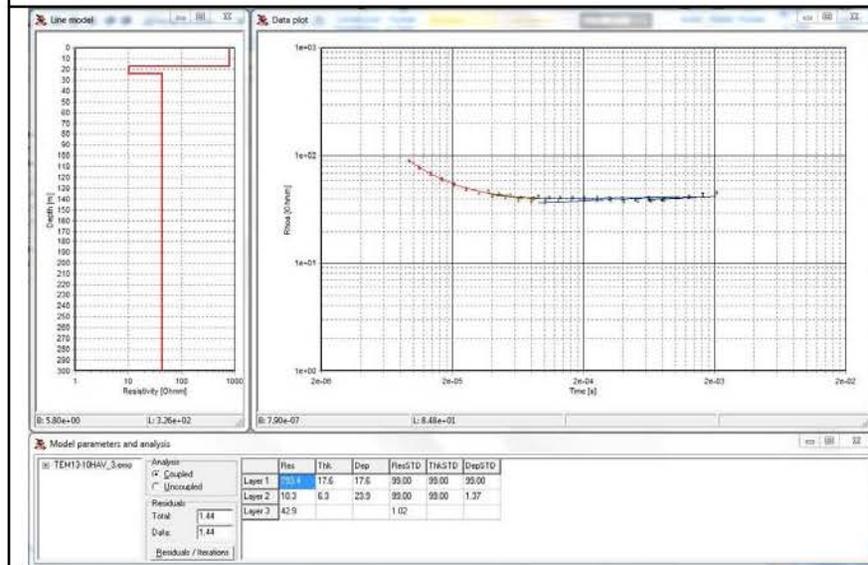


HA 11

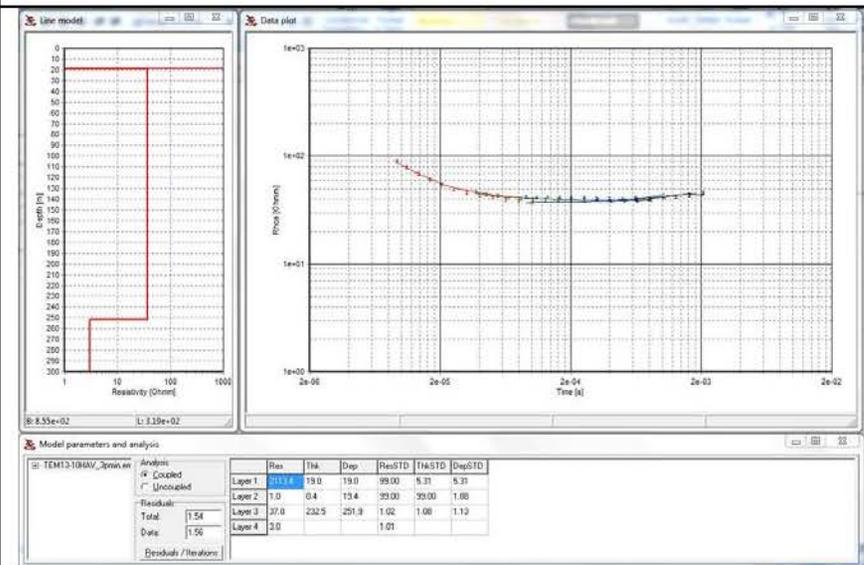


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

HA 12

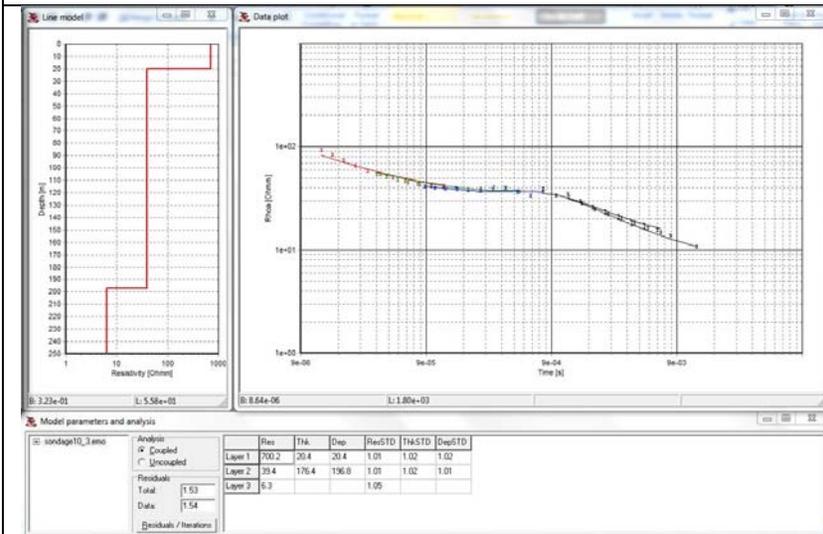


HA 12 (profondeur minimale)

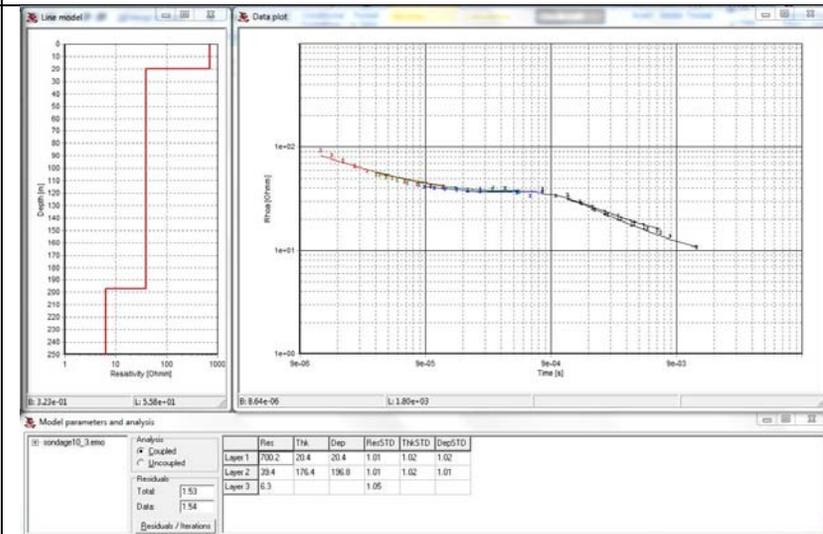


4- Havre-Aux-Maisons

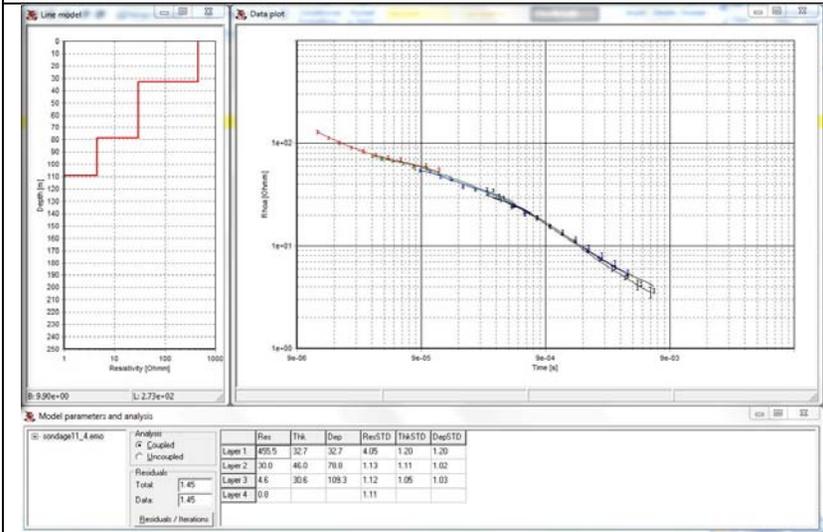
HAM 01



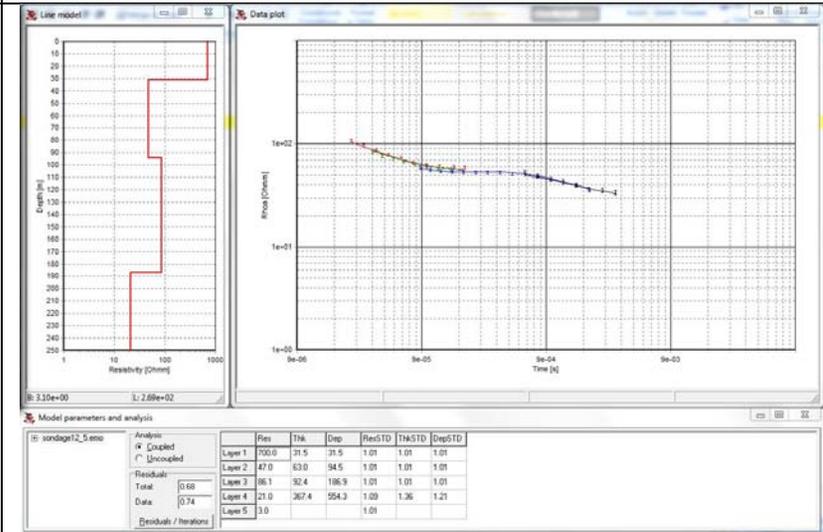
HAM 02



HAM 03

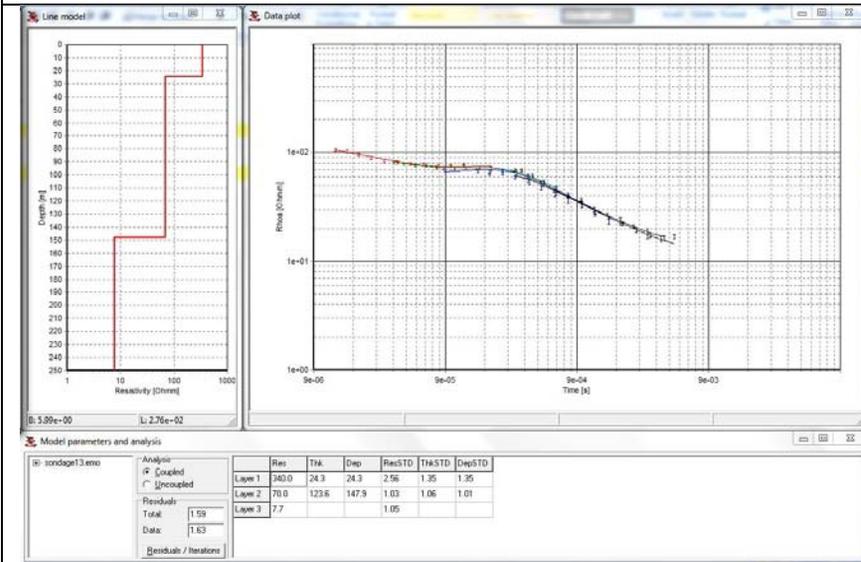


HAM 04

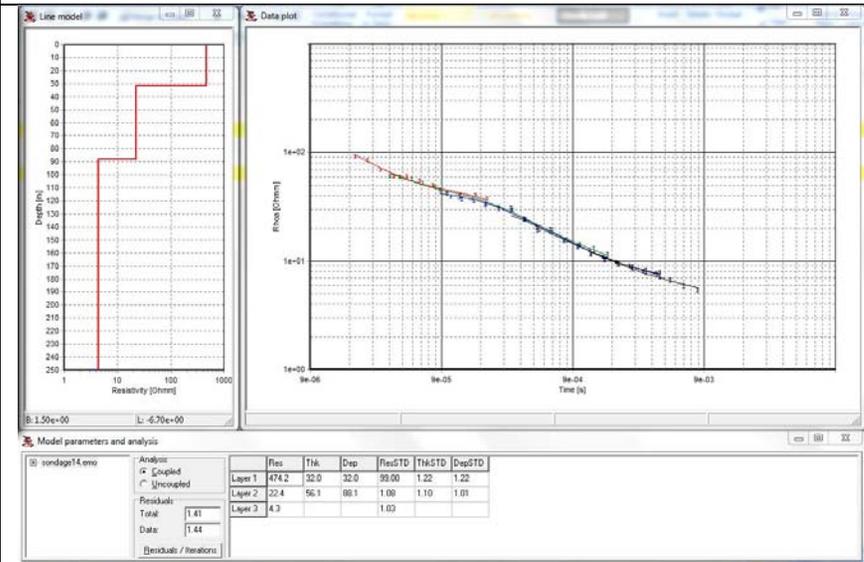


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

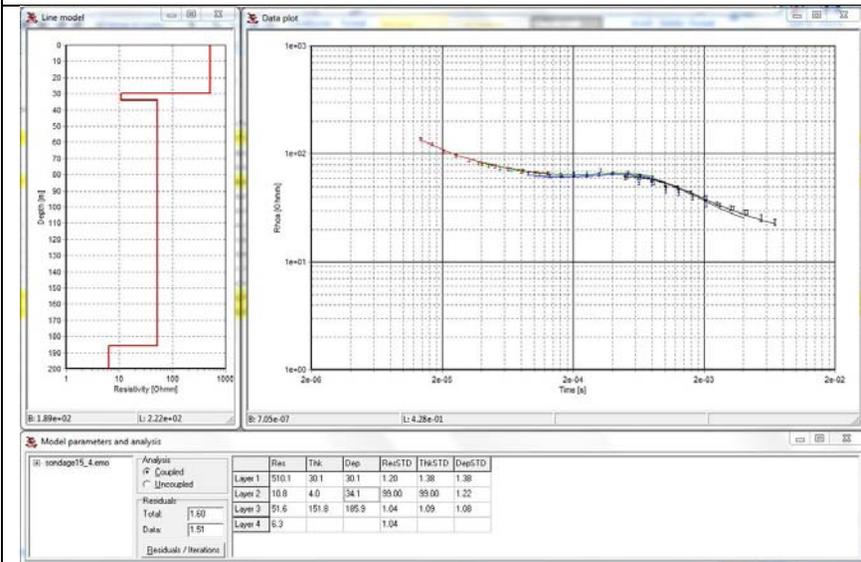
HAM 05



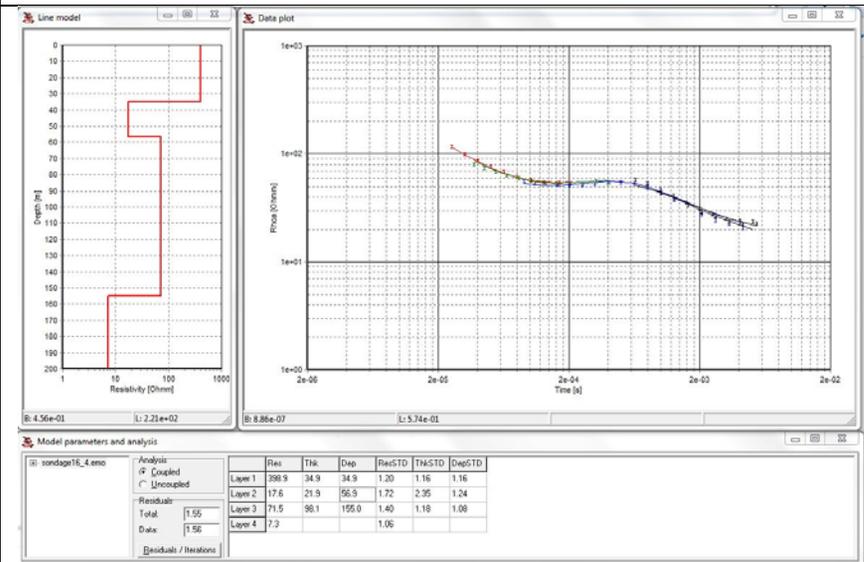
HAM 06



HAM 07

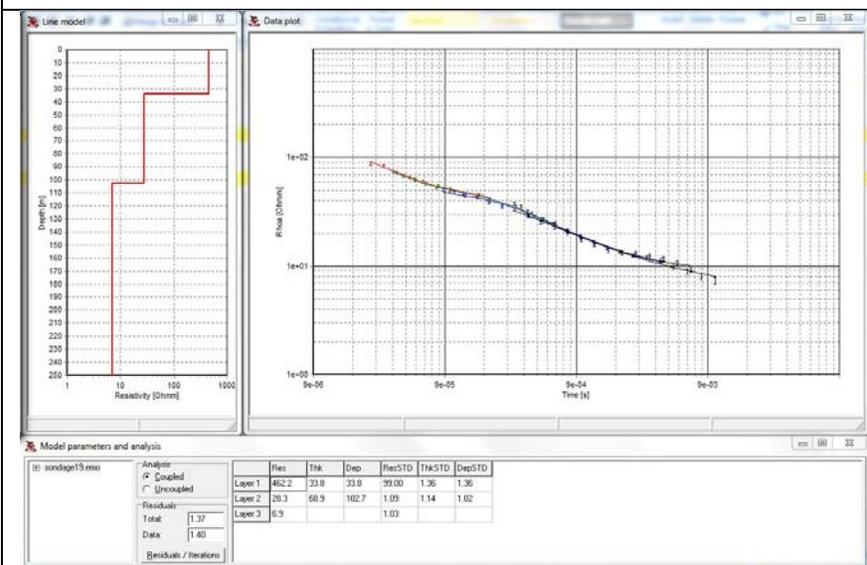


HAM 08

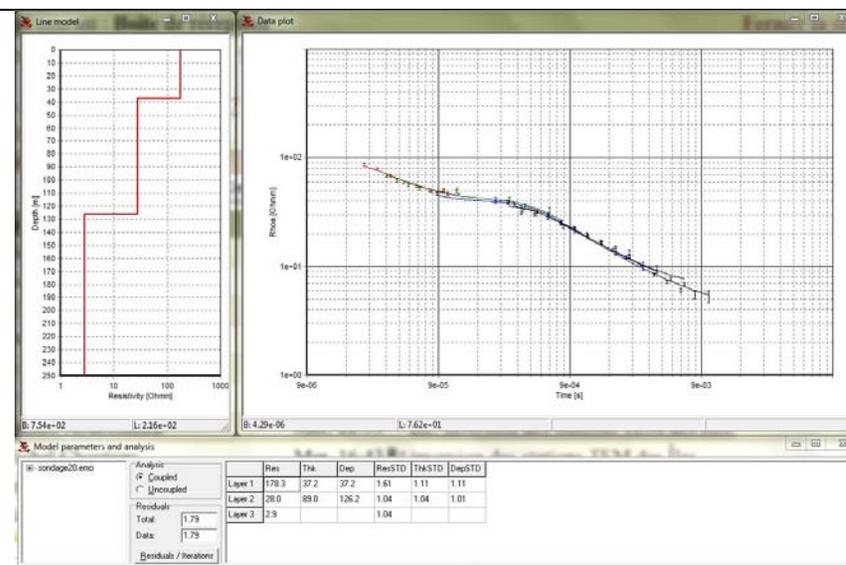


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

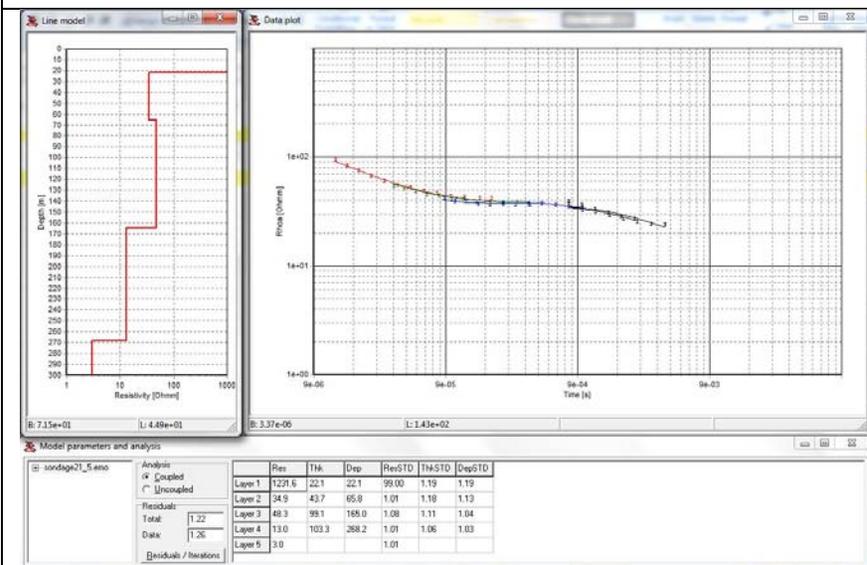
HAM 09



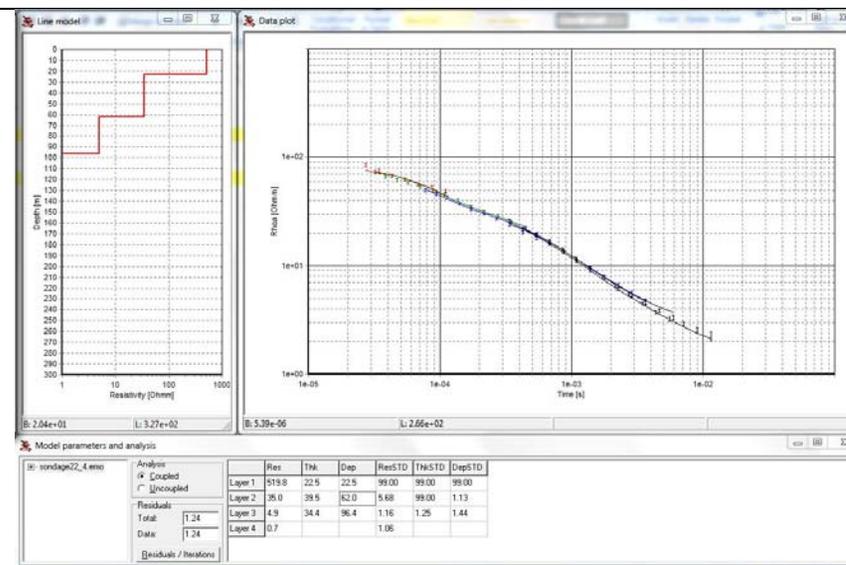
HAM 10



HAM 11

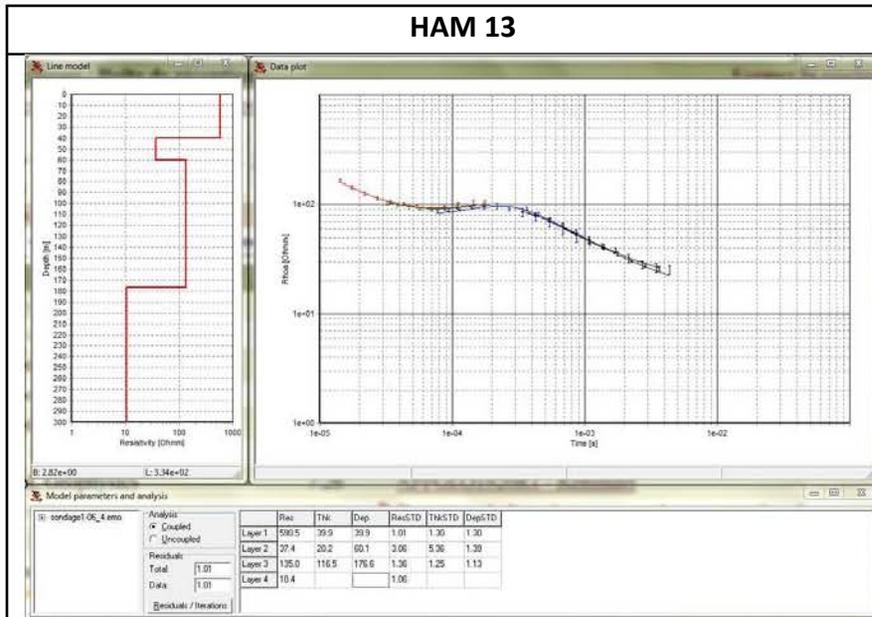


HAM 12

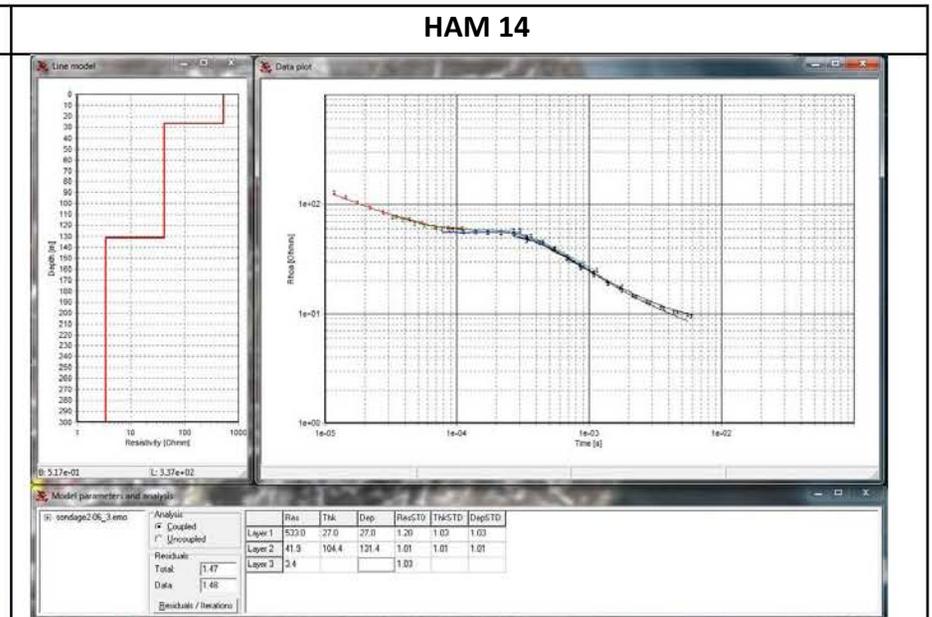


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

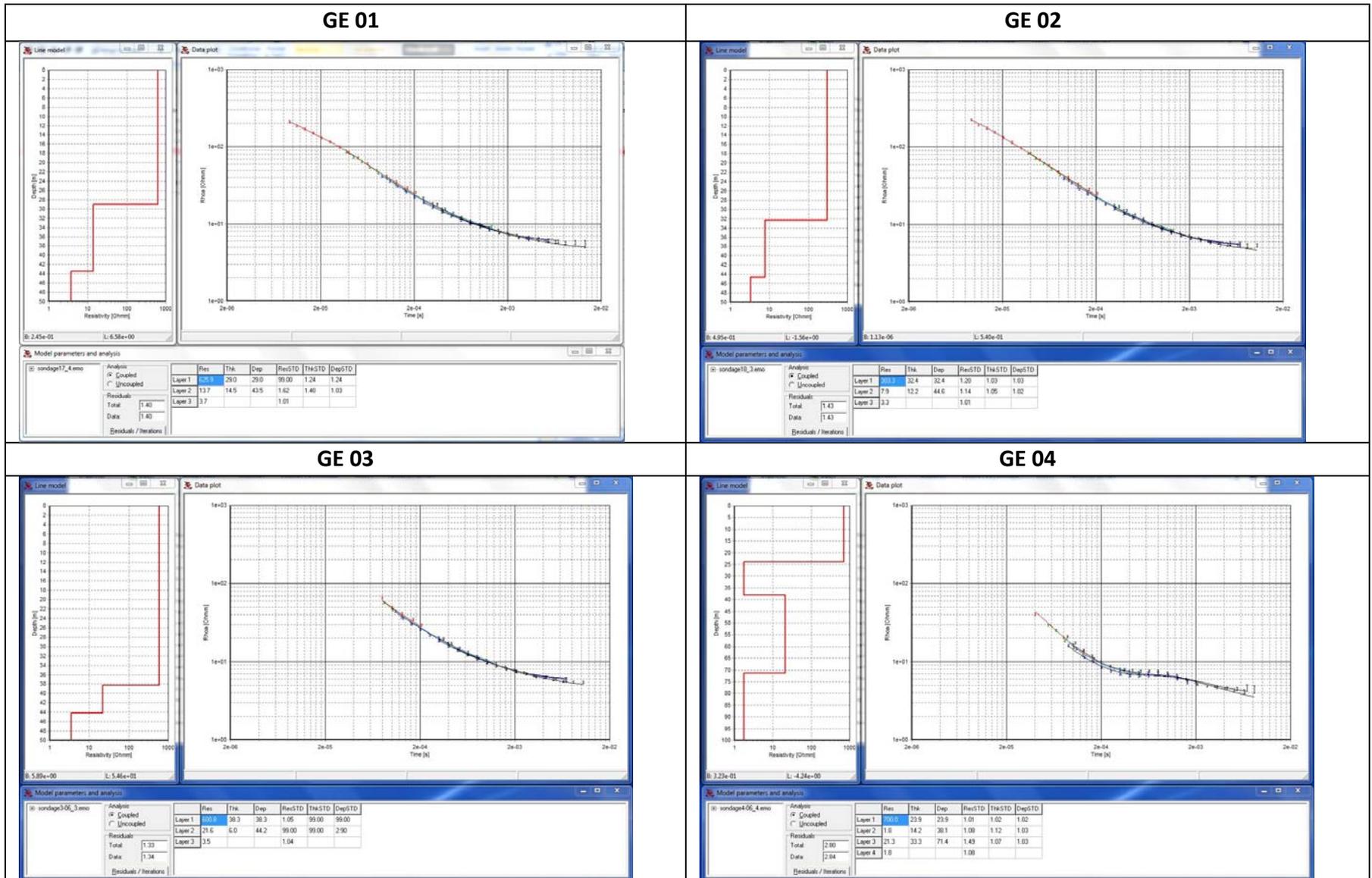
HAM 13



HAM 14

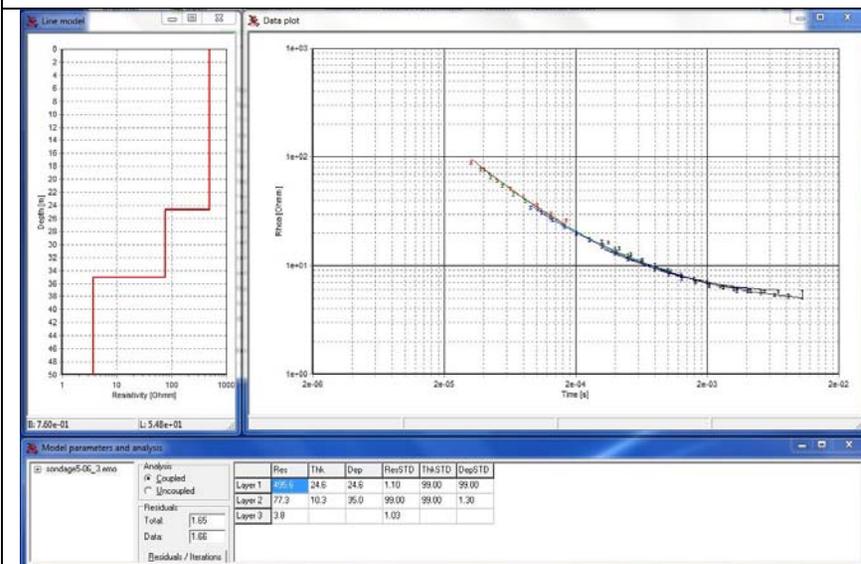


5- Grande-Entrée

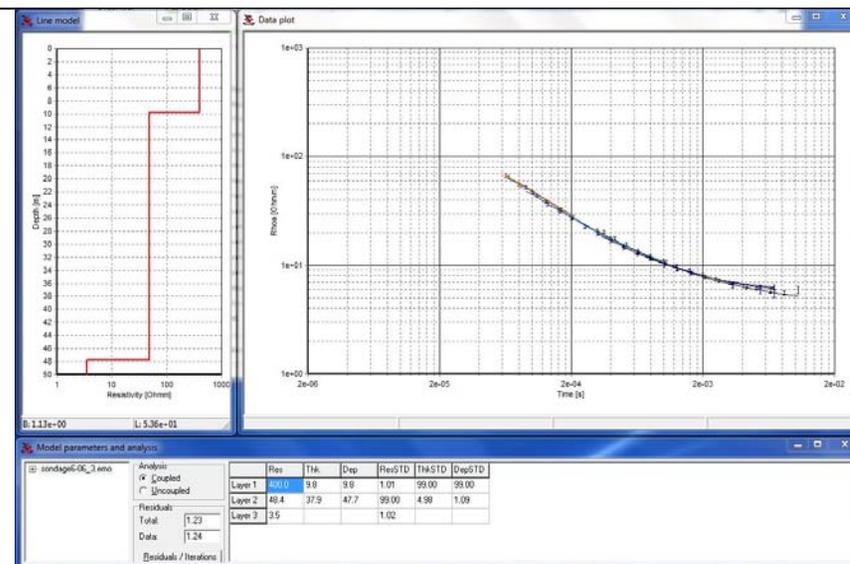


Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

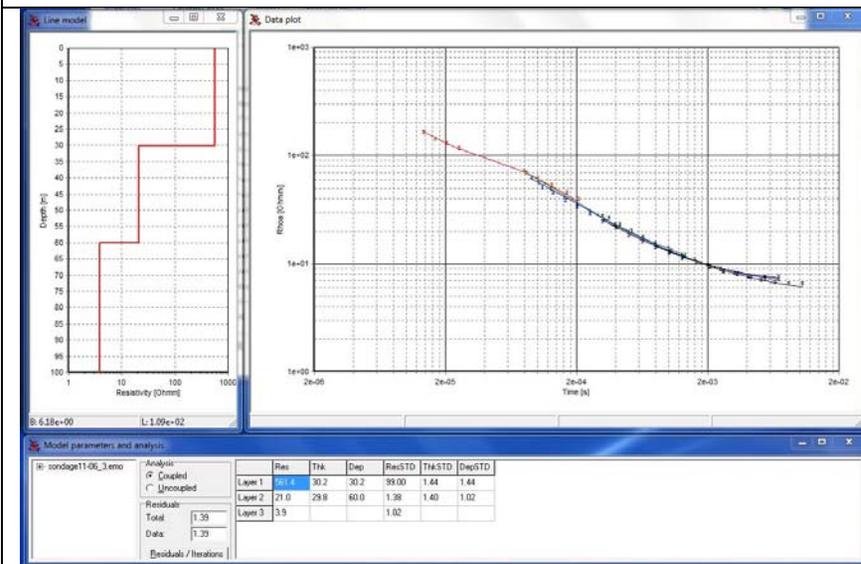
GE 05



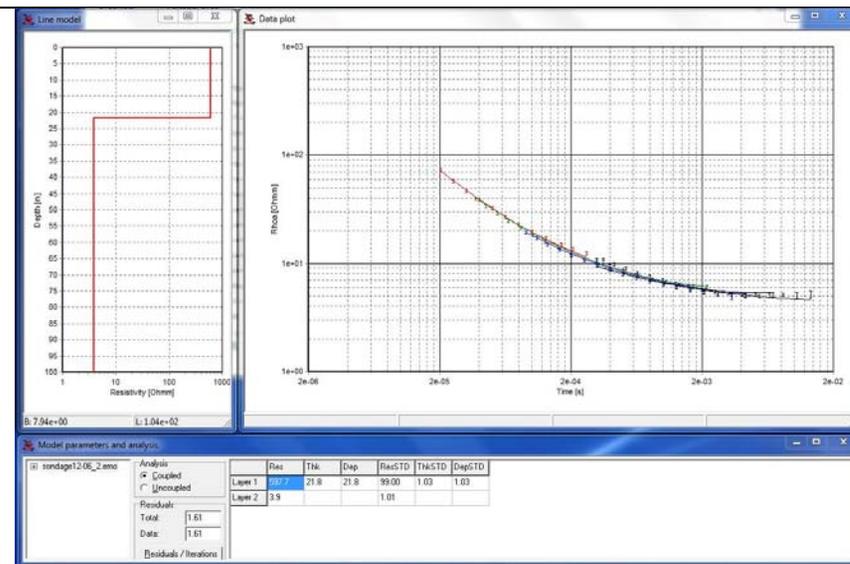
GE 06



GE 07

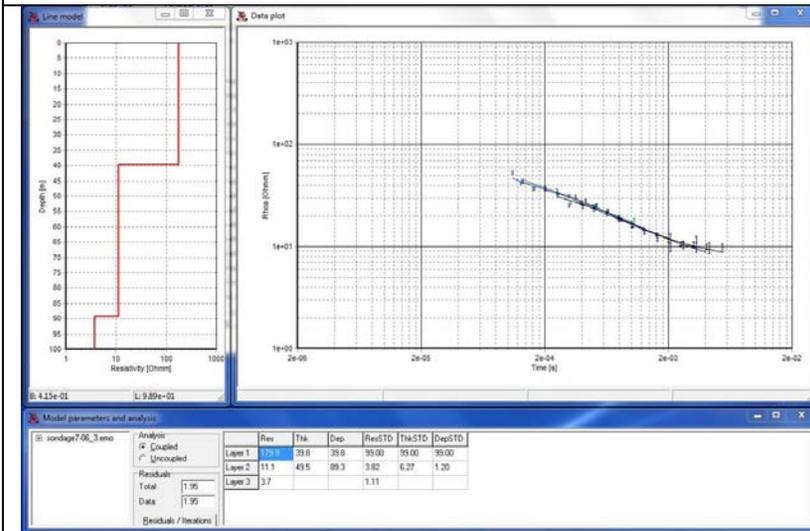


GE 08

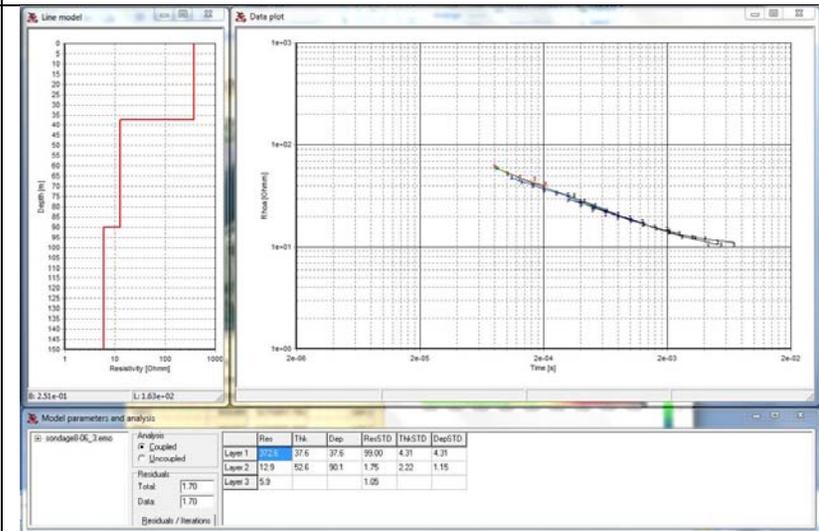


6- Grosse-Ile

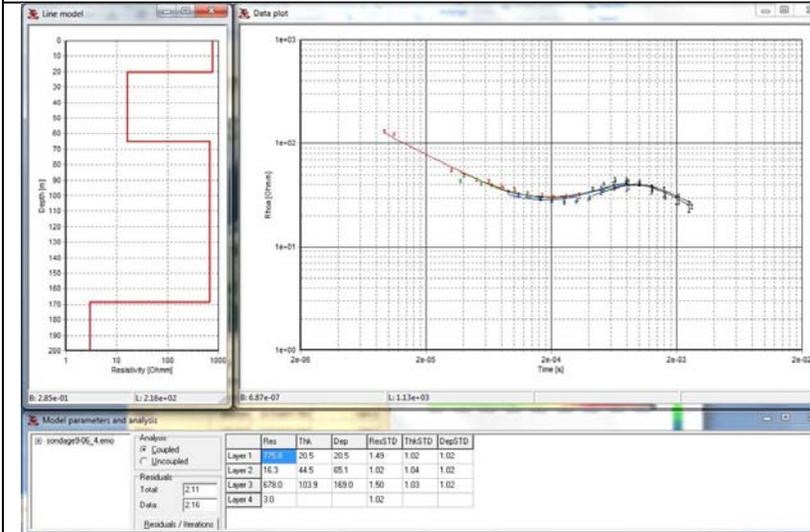
GI 01



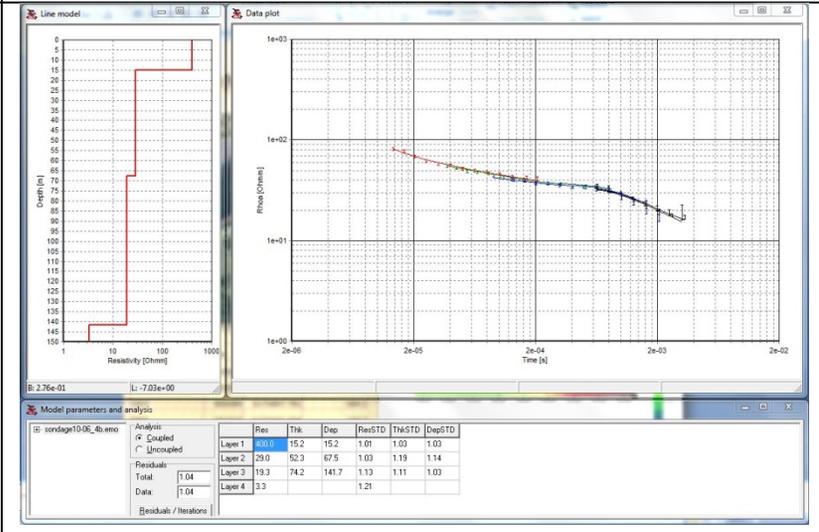
GI 02



GI 03

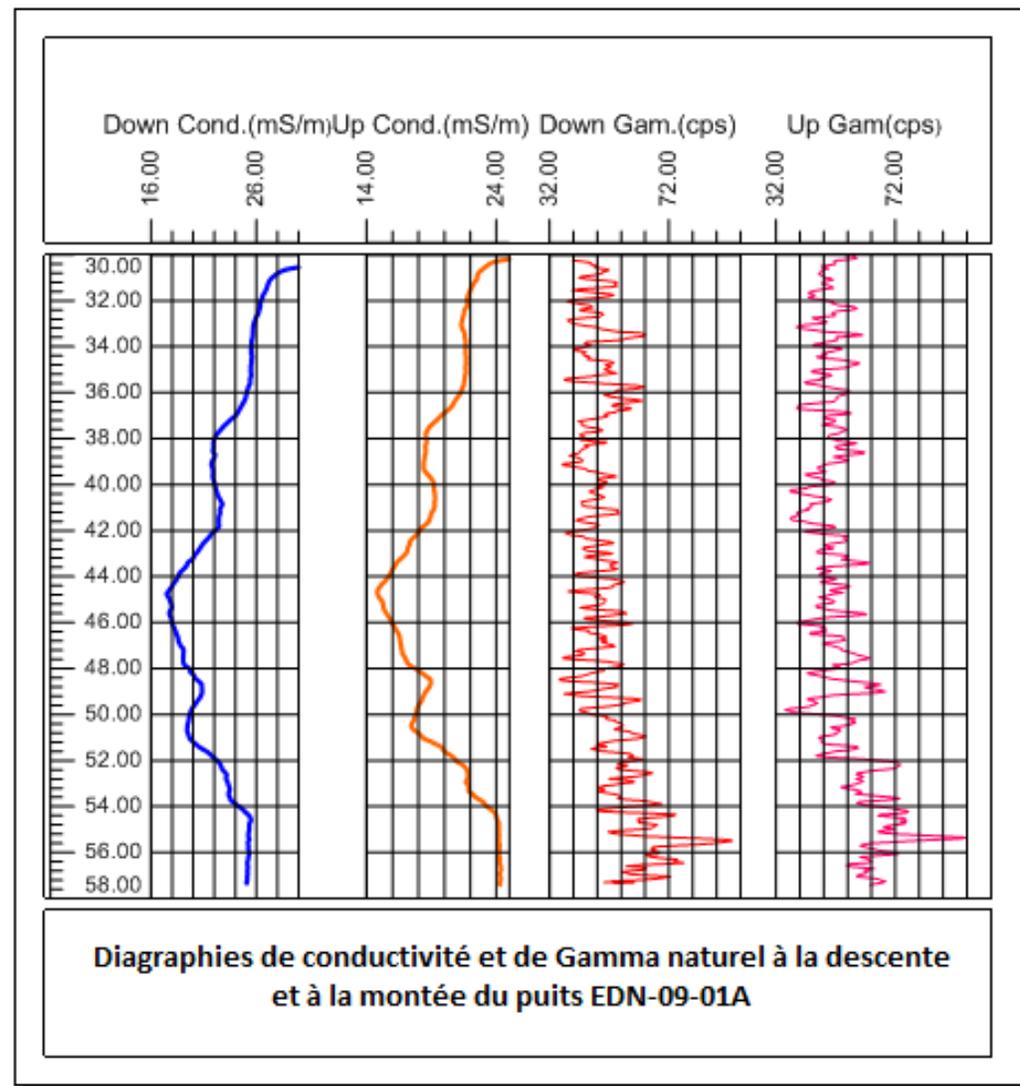


GI 04

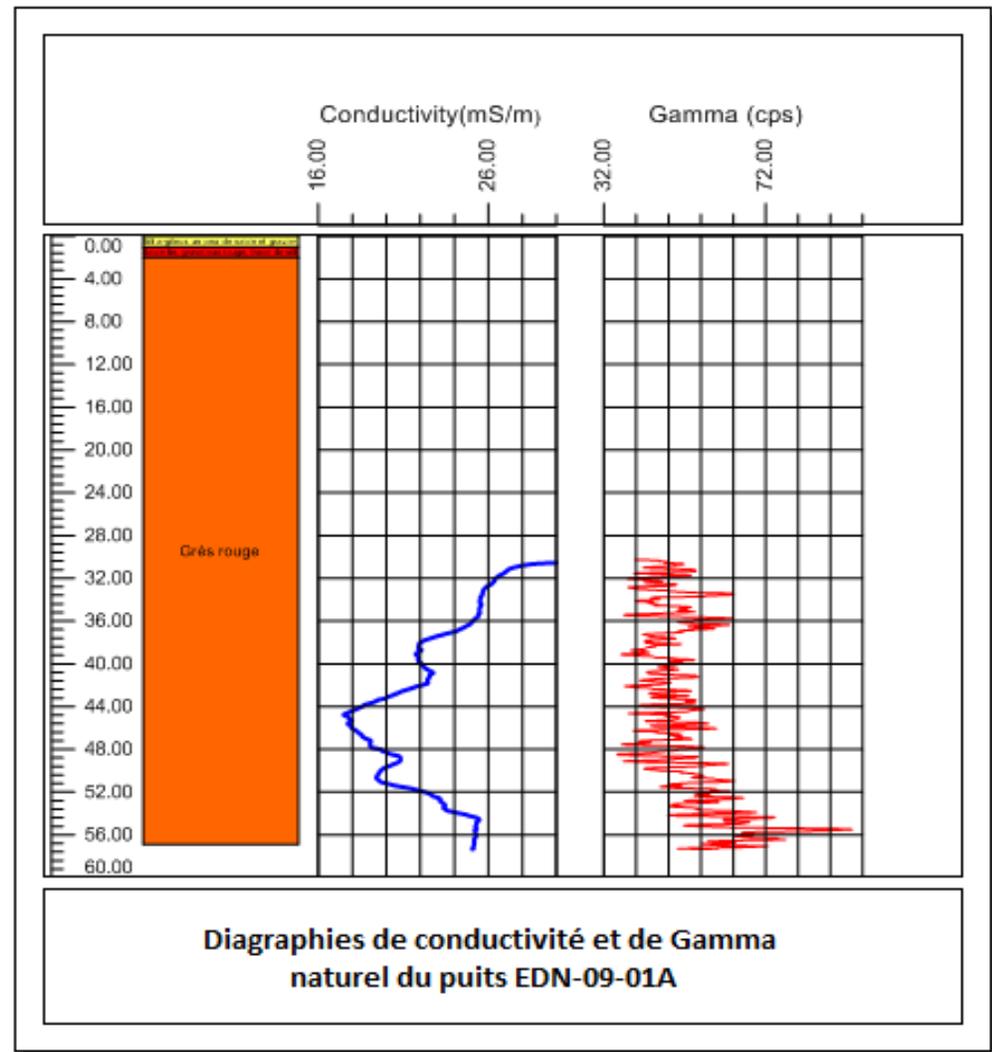


Annexe 3 : diagraphies EM39 des puits récents (2009) : conductivité et gamma naturel

Puits EDN09-01A



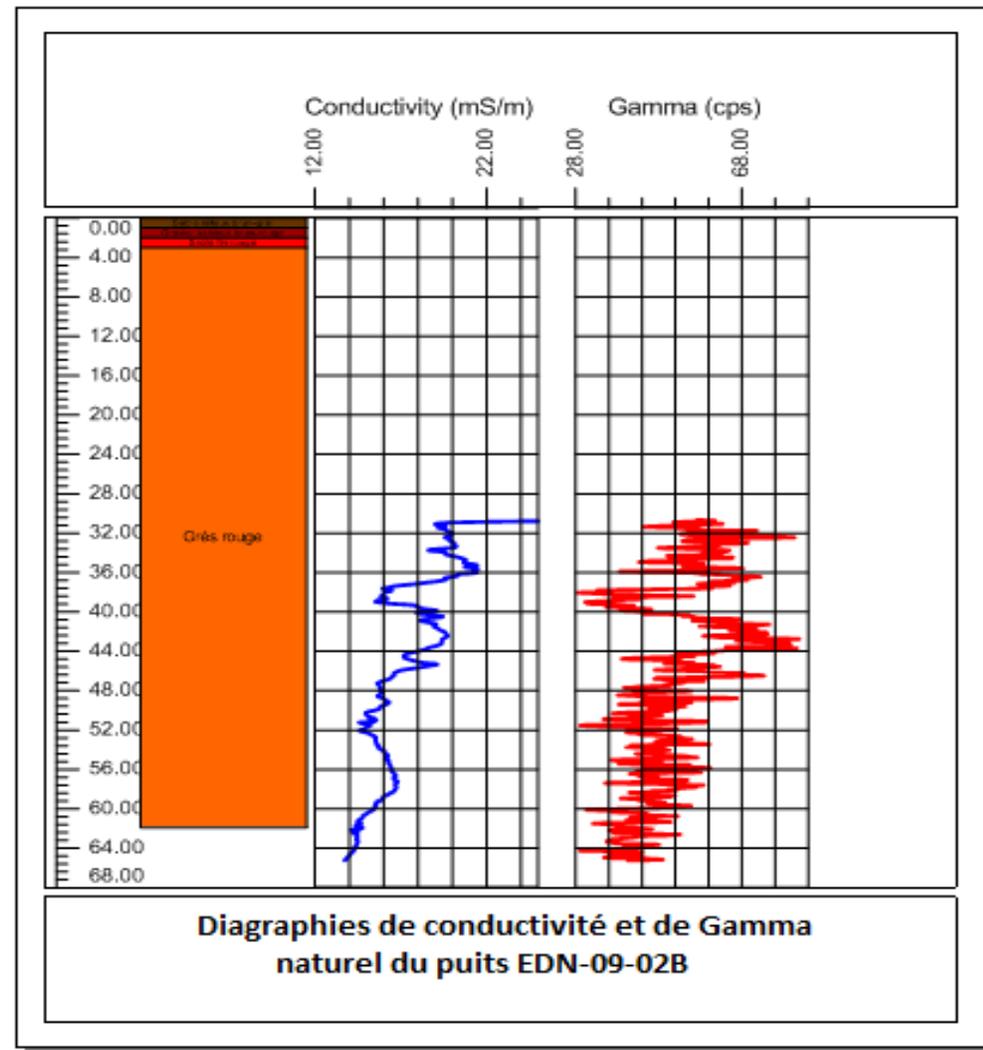
Test de reproductibilité: exemple des diagraphies EM39 à la descente et à la remontée du puits EDN-09-01A



Levé EM39 EDN-09-01A

La profondeur du puits EDN-09-01A est de 56.87 m et la profondeur du tubage en acier est de 29.61 m, ce qui laisse 27.6 m d'information utile. La conductivité sur l'épaisseur non tubée du puits varie autour de 18-26 mS/m correspondant à des résistivités de 38-56 Ω .m

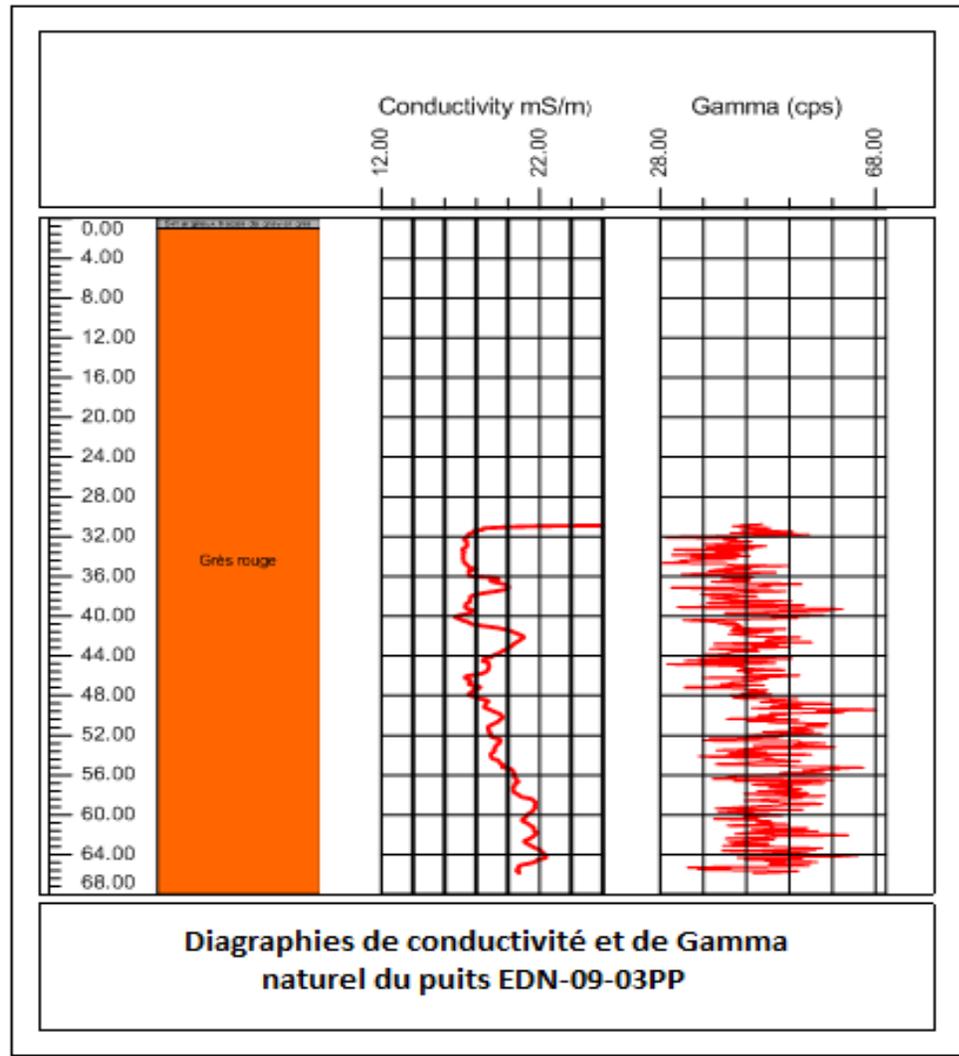
Puits EDN09-02B



Levé EM39 EDN-09-02B

La profondeur du puits EDN-09-02B est de 61.9 m et la longueur du tubage en acier est de 29.71 m. La conductivité varie autour de 14-21 mS/m correspondant à des résistivités de 47-77 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 32.19 m.

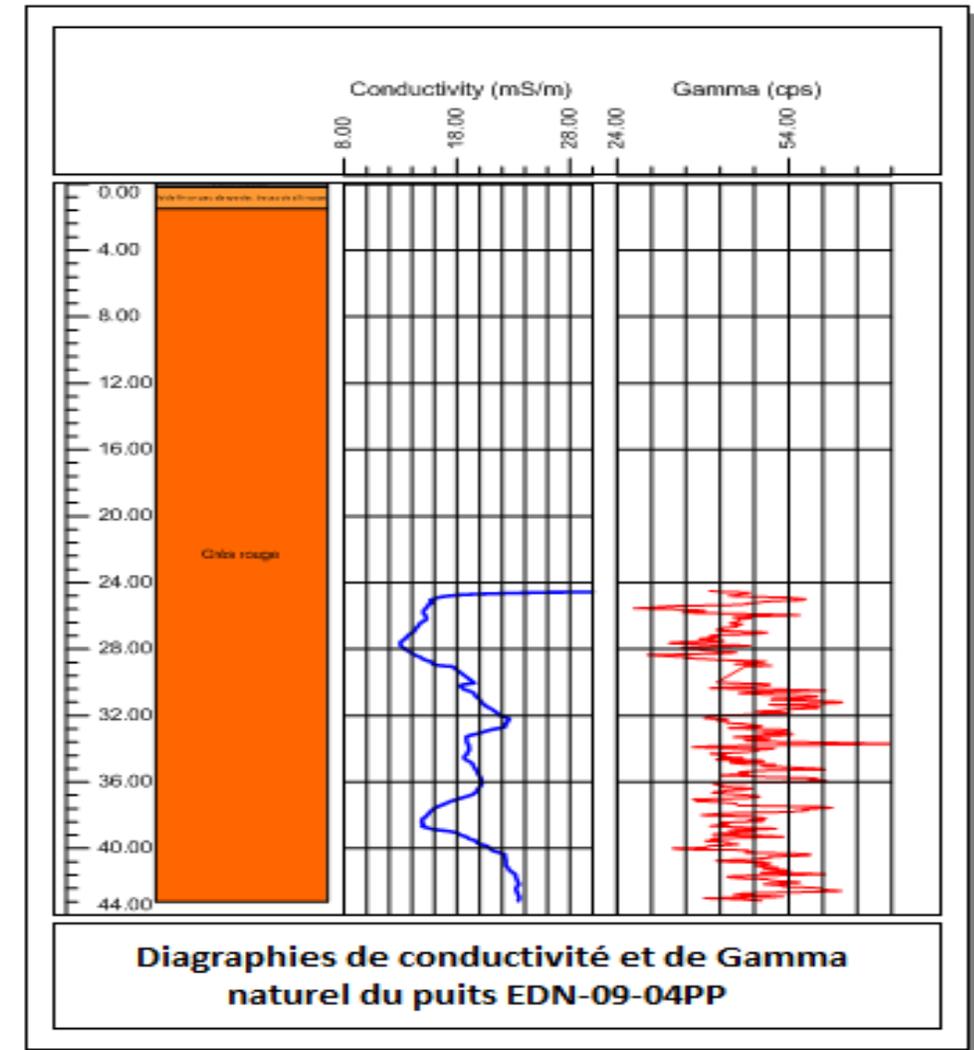
Puits EDN09-03PP



Levé EM39 EDN-09-03P

La profondeur du puits EDN-09-03PP est de 68 m et la longueur du tubage en acier est de 31.42 m. La conductivité varie autour de 17-22 mS/m correspondant à des valeurs de résistivités de 45-58 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 36.58 m.

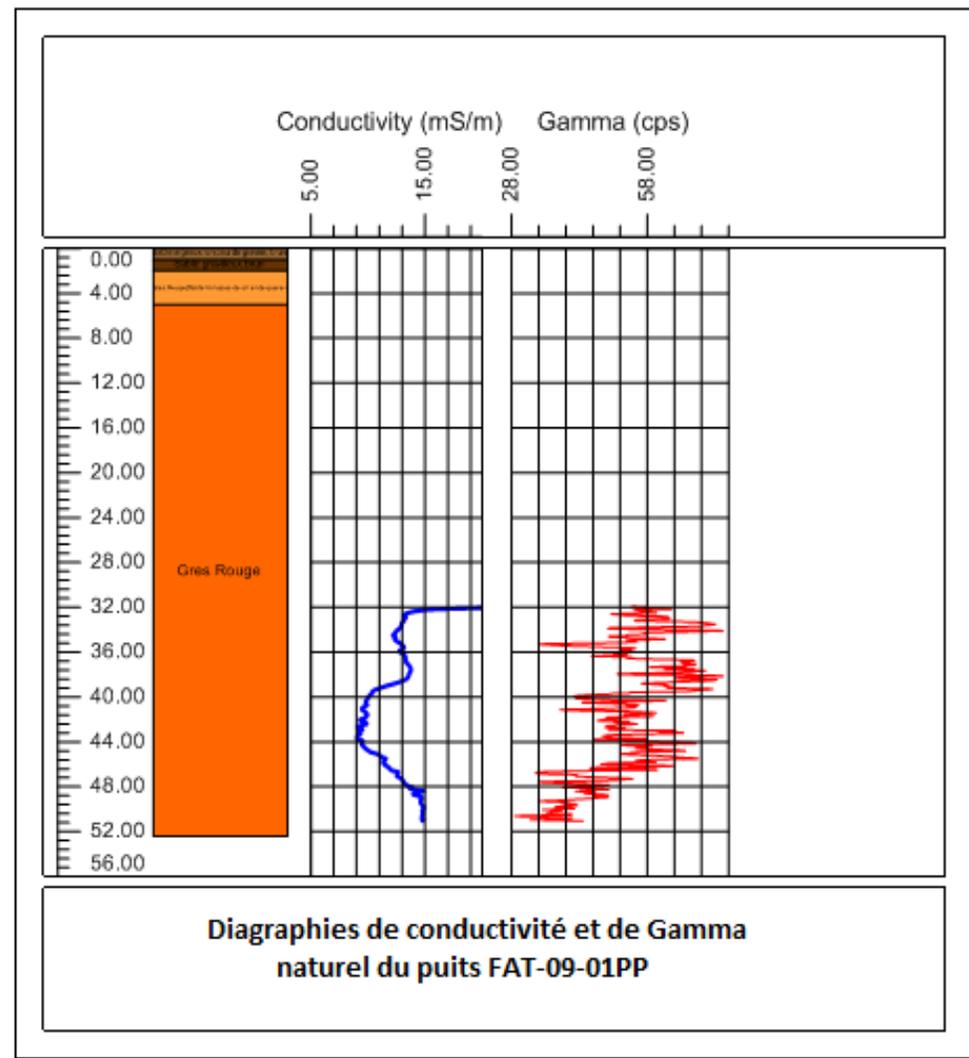
Puits EDN09-04PP



Levé EM39 EDN-09-04P

La profondeur du puits est de 43.2 m et la longueur du tubage en acier est de 23.52 m. La conductivité varie autour de 13-22 mS/m correspondant à des résistivités de 45-77 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 19.68 m.

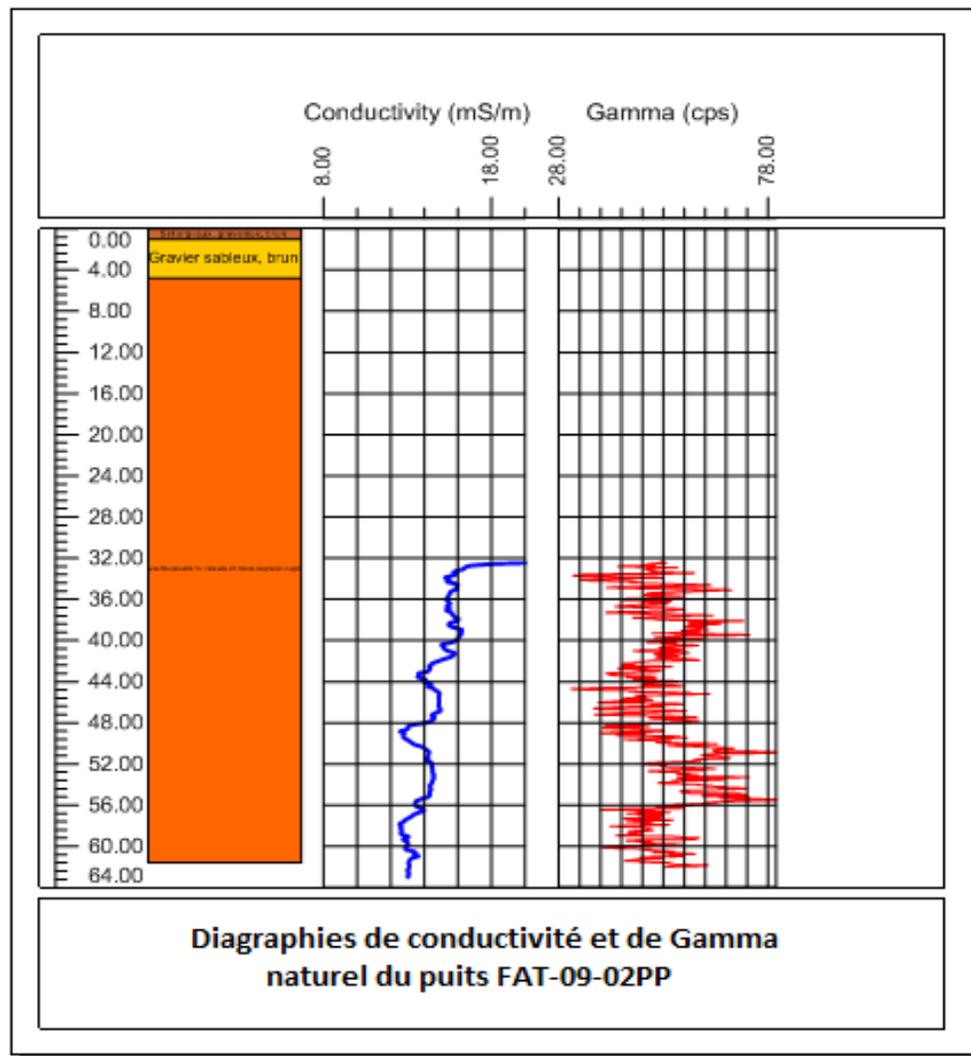
Puits FAT09-01P



Levé EM39 FAT-09-01PP

La profondeur du puits FAT-09-01PP est de 52.4 m et la longueur du tubage en acier est de 29.63 m. Dans les formations traversées par la sonde, la conductivité oscille autour de 9-15 mS/m ce qui correspond à des valeurs de résistivités de 66-111 $\Omega \cdot m$ pour une épaisseur non tubée du puits de 22.77 m.

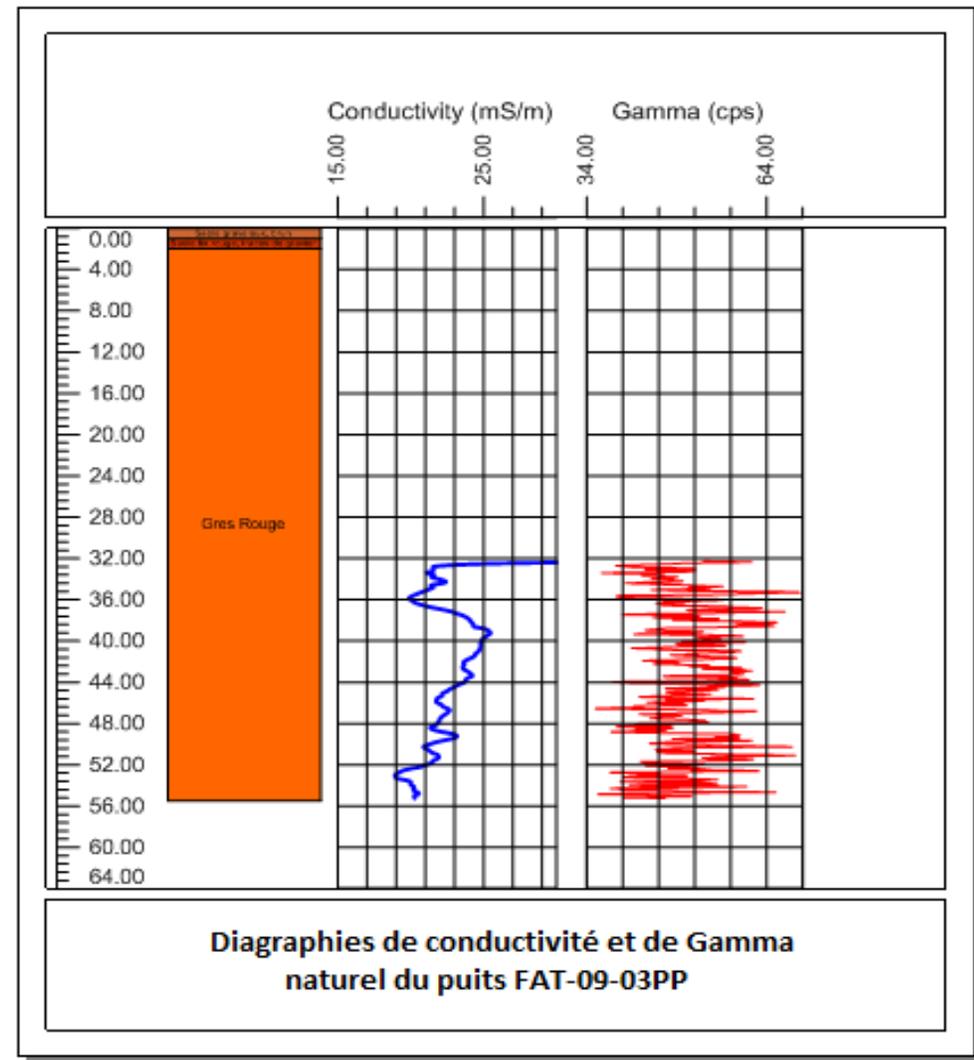
Puits FAT09-02P



Levé EM39 FAT-09-02 PP

La profondeur du puits FAT-09-02PP est de 61.6 m et la longueur du tubage en acier est de 29.67 m La conductivité varie très peu autour de 12-16 mS/m correspondant à des résistivités de l'ordre de 62-83 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 31.93 m.

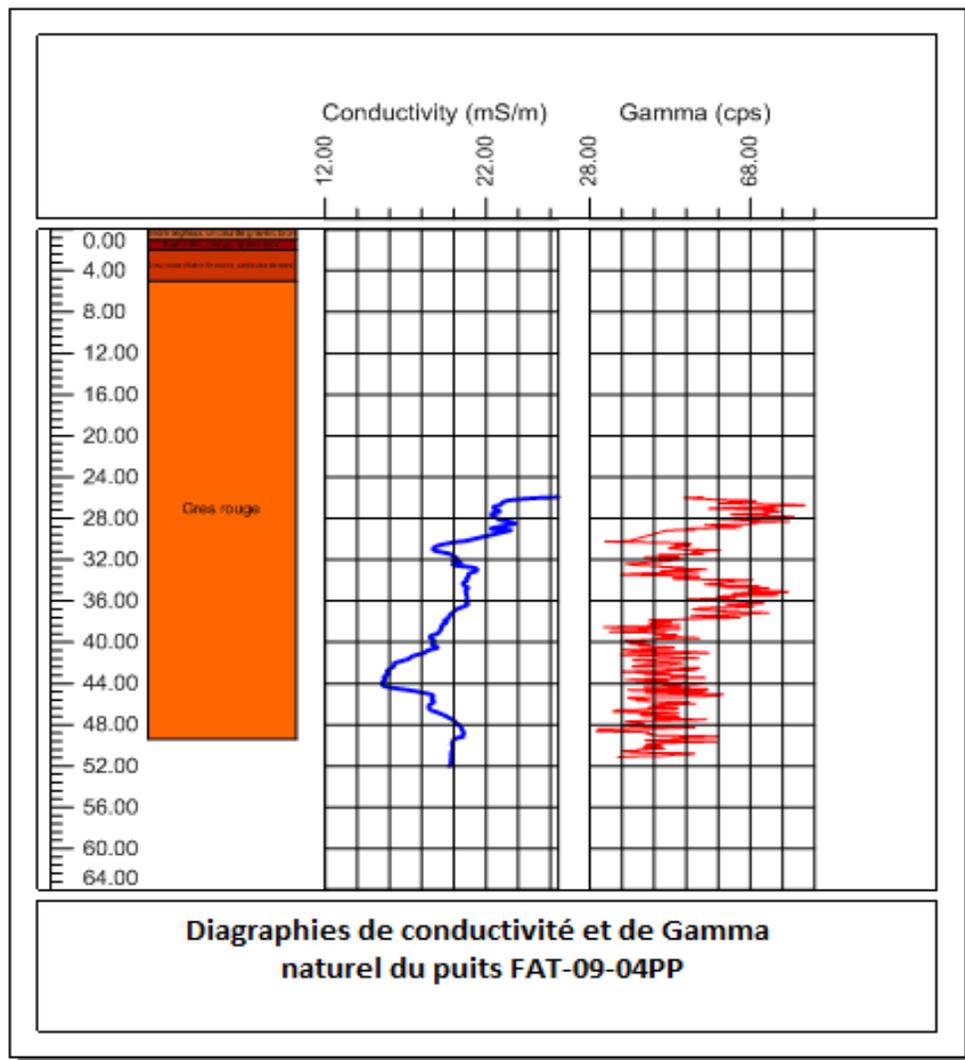
Puits FAT09-03PP



Levé EM39 FAT-09-03PP

La profondeur du puits FAT-09-03PP est de 55.5 m et la longueur du tubage en acier est de 29.66 m. Les valeurs de conductivité sont pratiquement constantes dans les formations traversées et varient autour de 19-25 mS/m correspondant à des valeurs de résistivités de 40-52 $\Omega \cdot m$ sur une épaisseur non tubée du puits de 25.84 m.

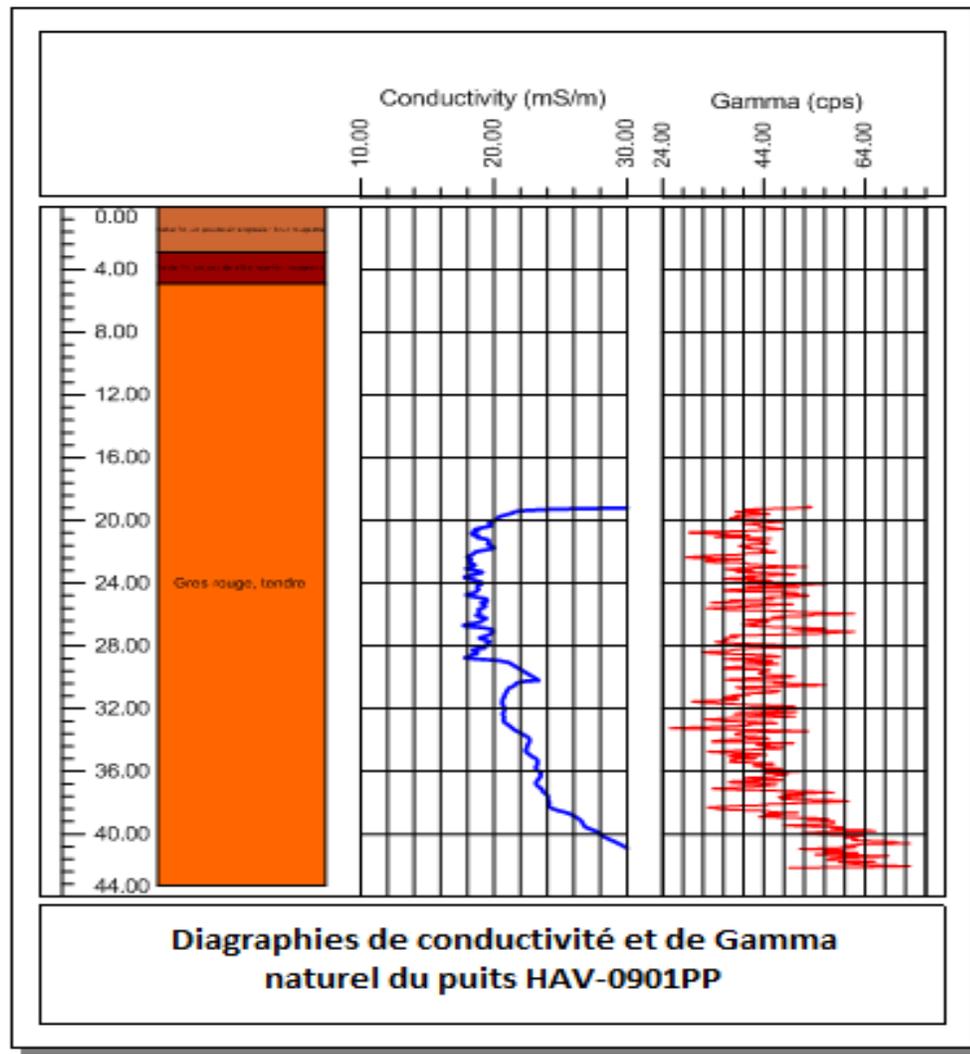
Puits FAT09-04P



Levé EM39 FAT-09-04PP

La profondeur du puits FAT-09-04PP est de 49.4 m et la longueur du tubage en acier est de 24.71 m La conductivité oscille autour de 14-20 mS/m correspondant à des résistivités de 50-71 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 24.69 m.

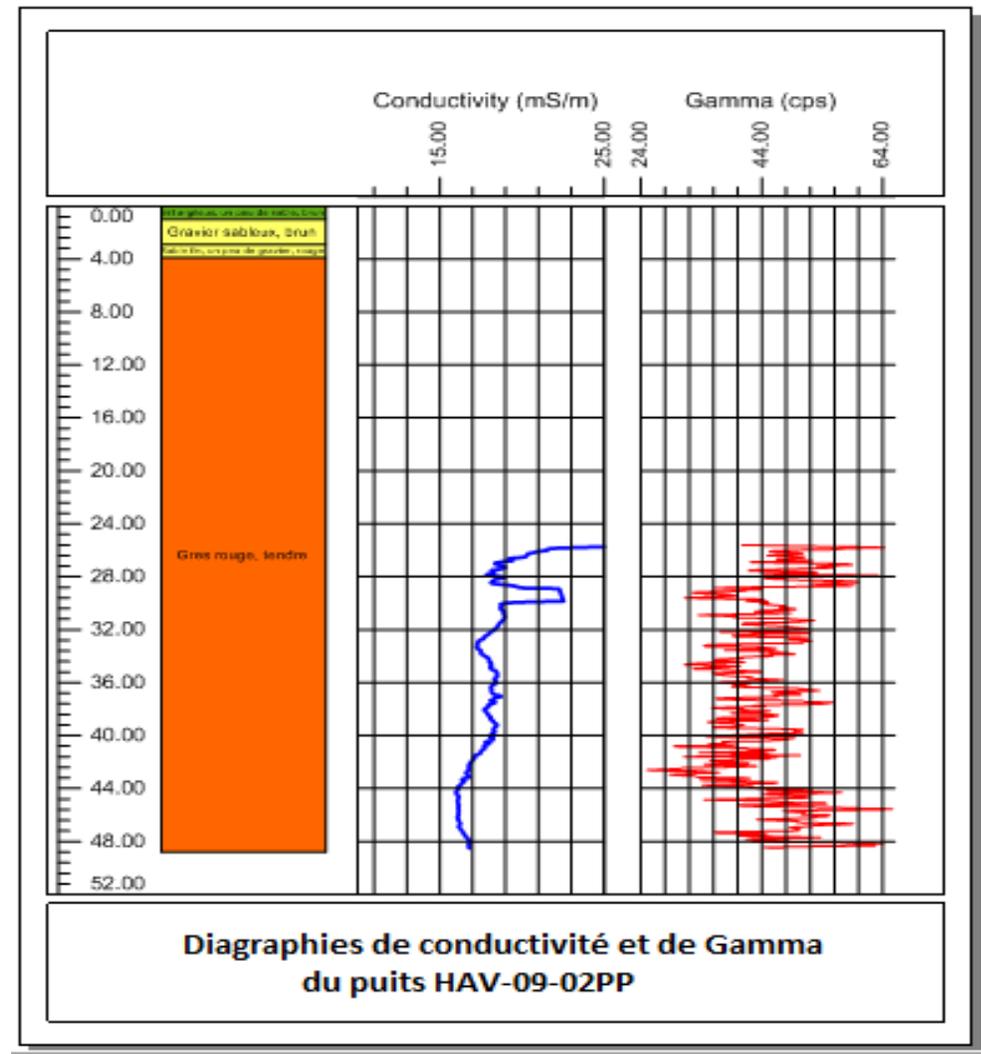
Puits HAM09-01PP



Levé EM 39 HAM-09-01PP

La profondeur du puits HAM-09-01PP est de 43.3 m et la longueur du tubage en acier est de 18.26 m. La conductivité oscille autour de 21-29 mS/m correspondant à des résistivités de 35-48 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 25.04 m.

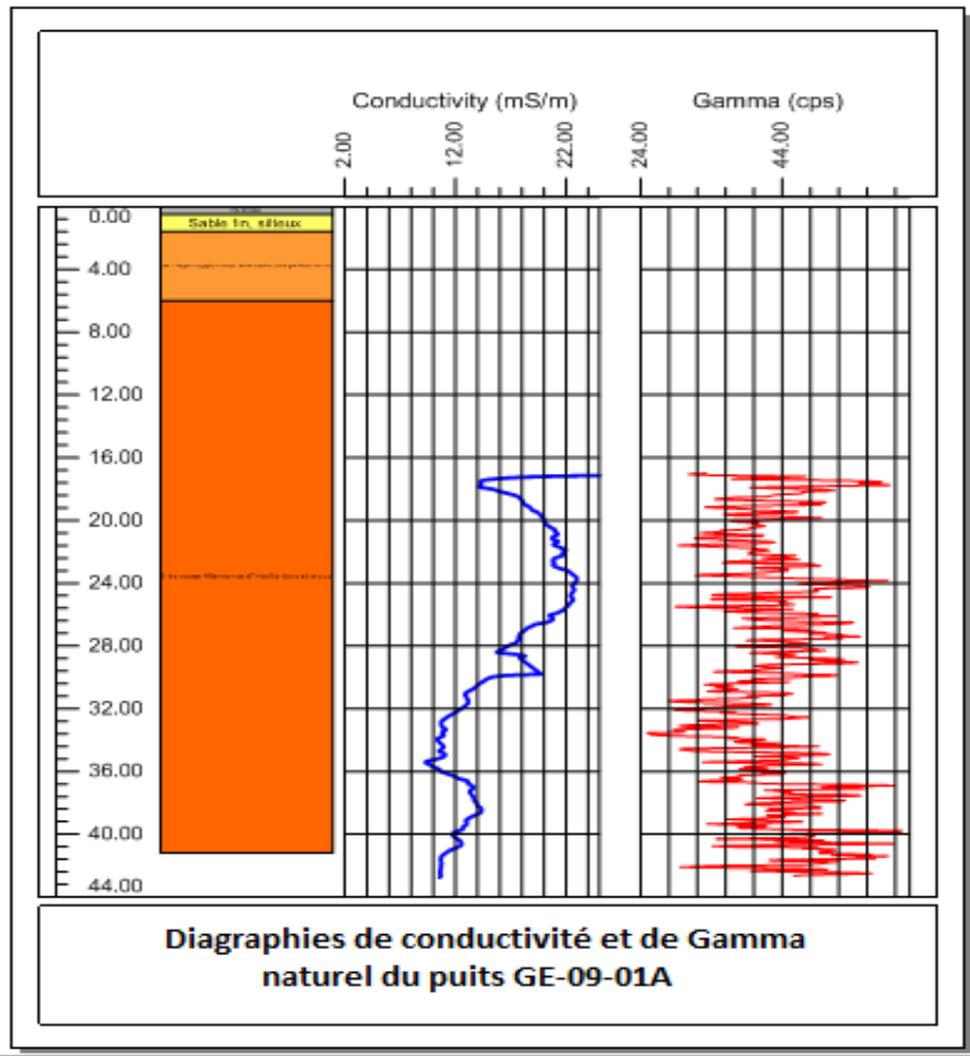
Puits HAM09-02PP



Levé EM39 HAM-09-02PP

La profondeur du puits HAM-09-02PP est de 48.8 m et la longueur du tubage en acier est de 27.21 m. La conductivité oscille autour de 16-21 mS/m correspondant à des résistivités de 48-62 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 21.59 m.

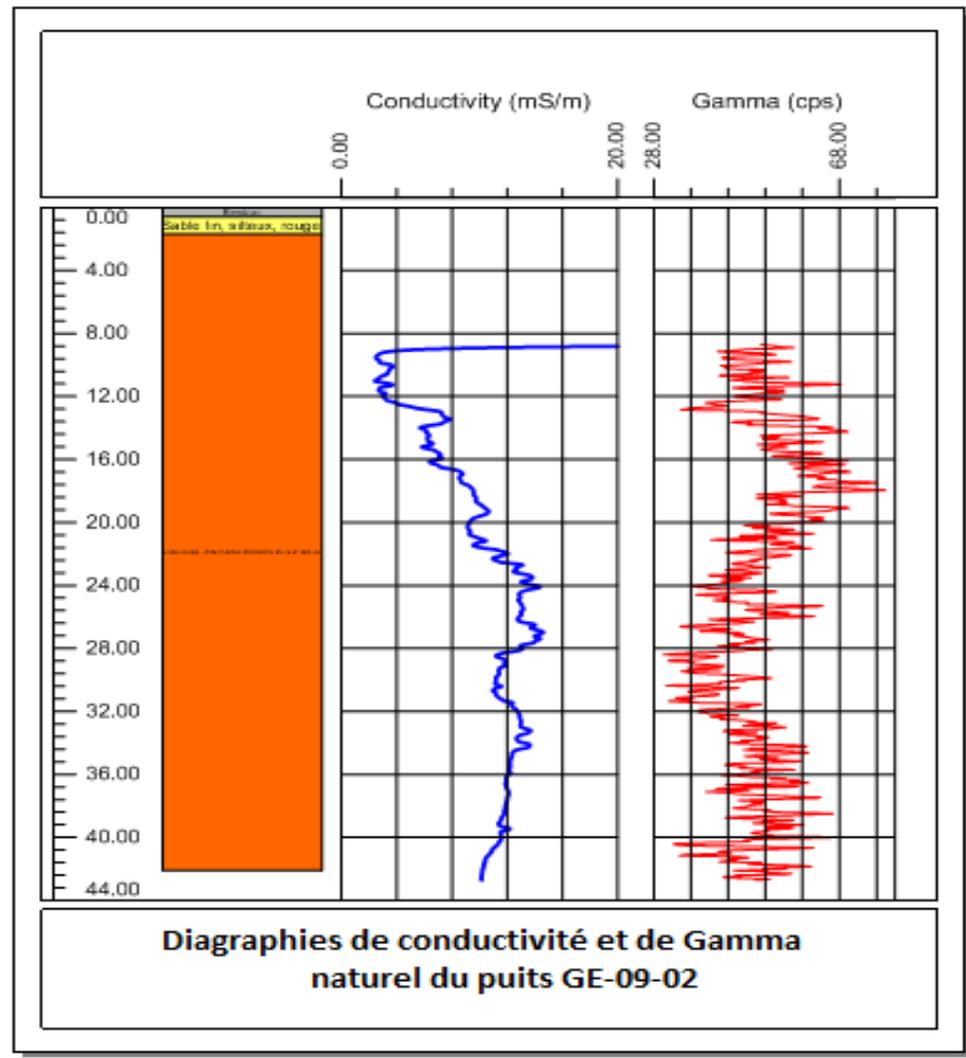
Puits GE09-01A



Levé EM39 GE-09-01A

La profondeur du puits GE-09-01A est de 41.2 m, alors que le tubage en acier a une profondeur de 28.96 m. La conductivité oscille autour de 9-22 mS/m correspondant à des résistivités de 45-111 Ω .m sur une épaisseur du puits non tubée de 12.24 m

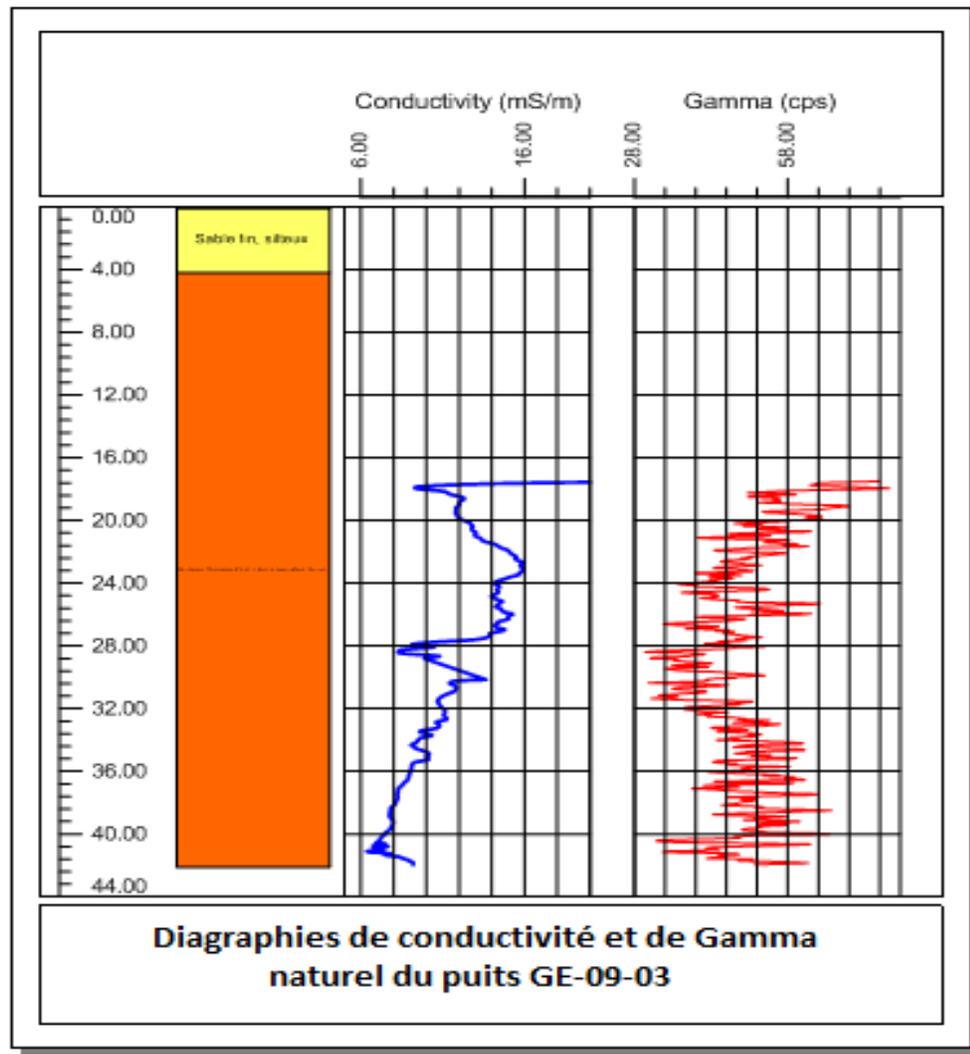
Puits GE09-02



Levé EM39 GE-09-02

La profondeur du puits GE-09-02 est de 42.1 m et le tubage en acier a une longueur de 8.47 m. La conductivité des formations autour du puits oscille autour de 3-15 mS/m correspondant à des résistivités de 66-333 Ω .m sur une épaisseur de 33.63 m.

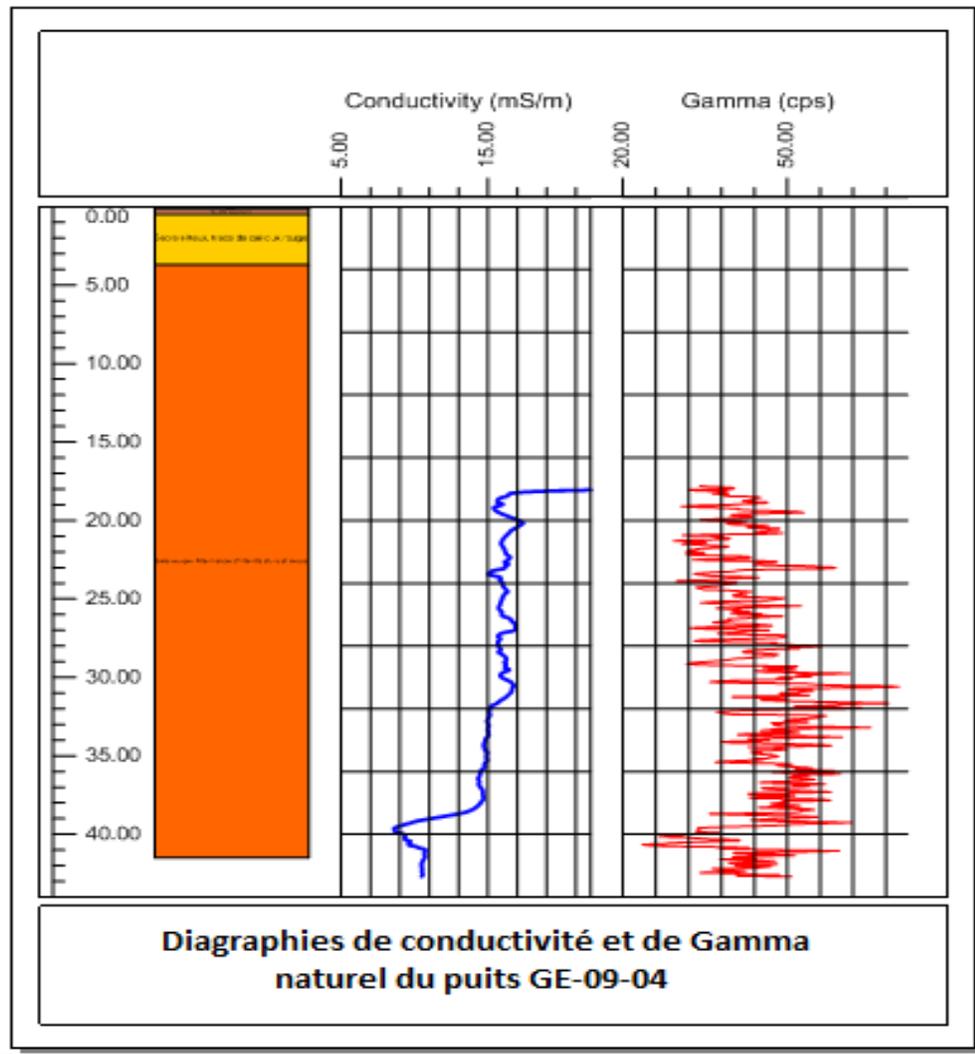
Puits GE09-03



Levé EM39 GE-09-03

Le puits GE-09-03 a une profondeur de 42.1 m et le tubage en acier a une longueur de 16.88 m. La conductivité varie autour de 7-16 mS/m correspondant à des résistivités de 62-142 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 25.22 m

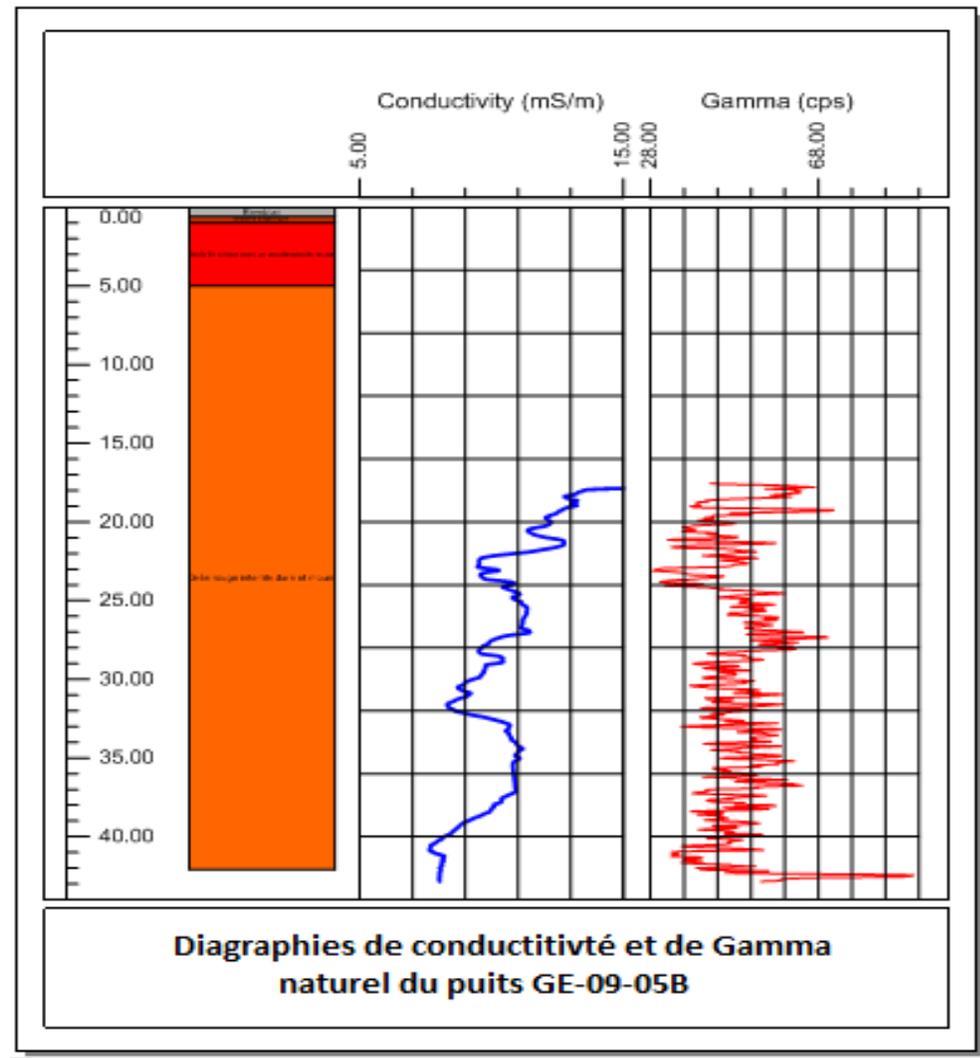
Puits GE09-04



Levé EM39 GE-09-04

Le puits GE-09-04 a une profondeur de 41.5 m et le tubage en acier a une longueur de 16.78 m. La conductivité des formations traversées varie autour de 9-17 mS/m correspondant à des résistivités de 58-111 Ω .m sur une épaisseur non tubée du puits de 24.72 m

Puits GE09-05B



Levé EM39 GE-09-05B

La profondeur du puits GE-09-05B est de 42.1 m et le tubage en acier a une longueur de 16.21 m. La conductivité des formations traversées dans ce puits varie autour de 8-13 mS/m correspondant à des résistivités de 77-125 Ω sur une épaisseur non tubée du puits de 25.89 m.

Annexe 4 : détermination de la zone de mélange par sondage TEM

La modélisation des données aux Îles-de-la-Madeleine est réalisée à l'aide du logiciel EMMA développée par le groupe HGG de l'université d'Aarhus. La fenêtre d'enregistrement en temps est celle du système Geonics TEM47 et le modèle aquifère considéré est déduit des mesures électriques effectuées par le groupe Madelin'Eau. Une configuration centrale a été utilisée avec une boucle de transmission de 50m X 50m. Cette modélisation est effectuée afin de déterminer la sensibilité de la méthode TDEM à résoudre l'épaisseur de la zone de transition (zone saumâtre) entre l'eau douce et l'eau salée (FWSWT). Un modèle à 4 couches a été choisi pour faire la modélisation. Nous avons fait varier l'épaisseur de la troisième couche h_3 en fixant la profondeur de la nappe saline p_3 . La résistivité la zone de transition considérée dans notre modélisation est de $\rho_3=10 \Omega.m$ et la résistivité de la nappe saline considérée est de $3 \Omega.m$. Nous avons utilisé une profondeur à la nappe saline de 100 m pour des épaisseurs de 1m, 5m, 10m et 30 m et une profondeur de 130 m pour des épaisseurs de 10m et 30 m pour les modèle de Cap-Aux-Meules et Havre-Aux-Maisons. À Grande-Entrée, deux épaisseurs de la zone de mélange ont été utilisés, 5 m et 10 m, pour une profondeur de la nappe saline de 40 m. Des tests d'épaisseur de la zone de mélange trop mince ($h_3=1m$) par rapport à la profondeur de la nappe saline ont montré qu'on ne peut résoudre une couche aussi mince. L'inversion des données modélisées a été effectuée par le logiciel SEMDI-SITEM développée par la même groupe cité plus haut. Il est à noter que l'interprétation des données se base sur un modèle 1D.

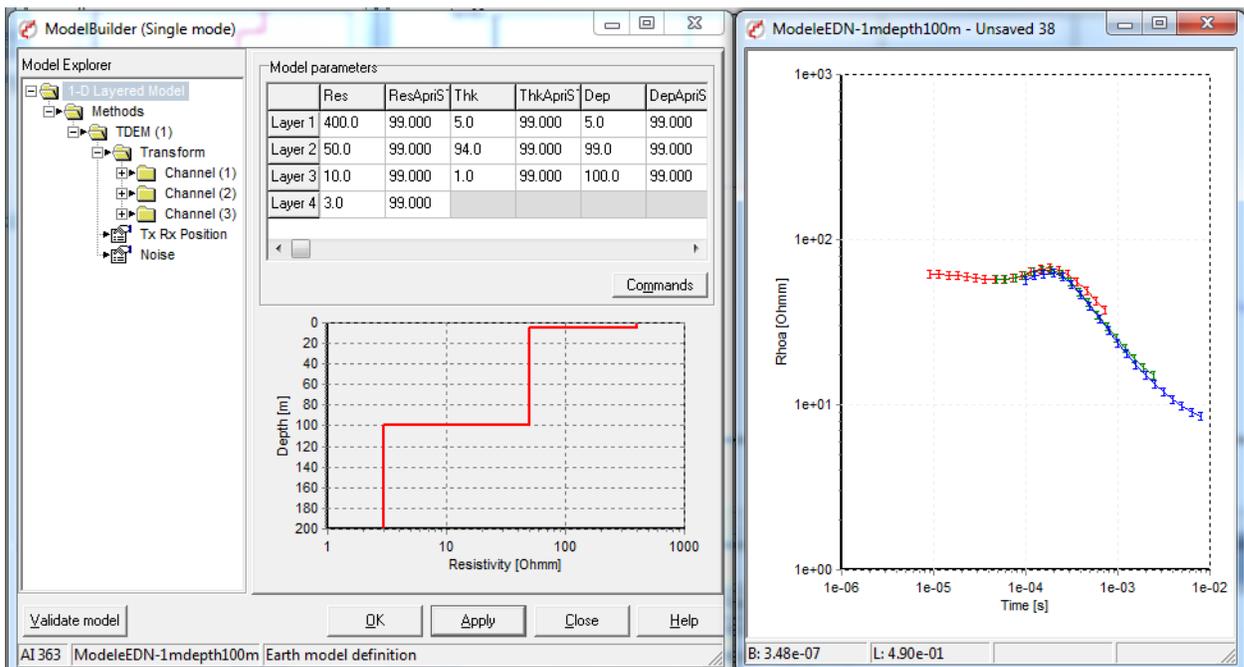


Figure A4-1 : Modèle EDN $h_3=1$ m $p_3=100$ m

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

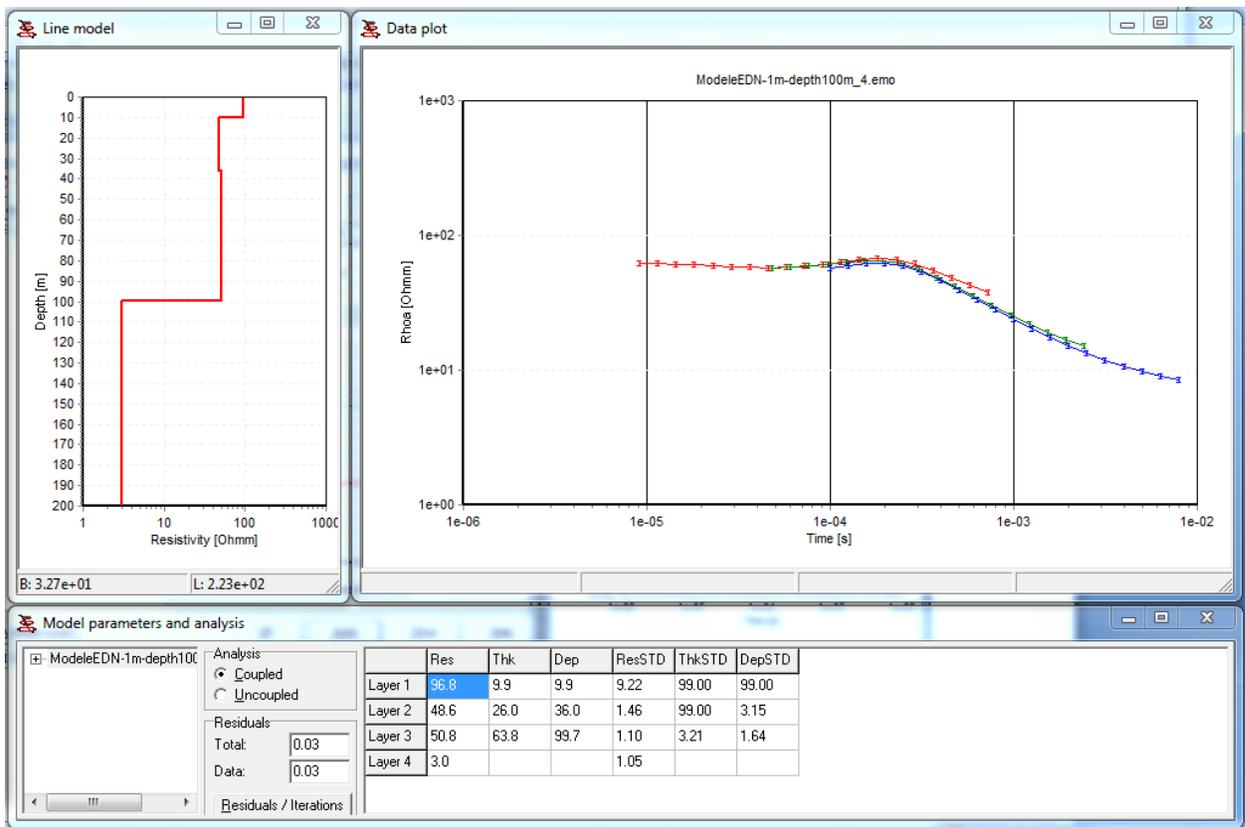


Figure A4-2 : Inversion du modèle EDN h3=1 m p3=100 m sans contraintes

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

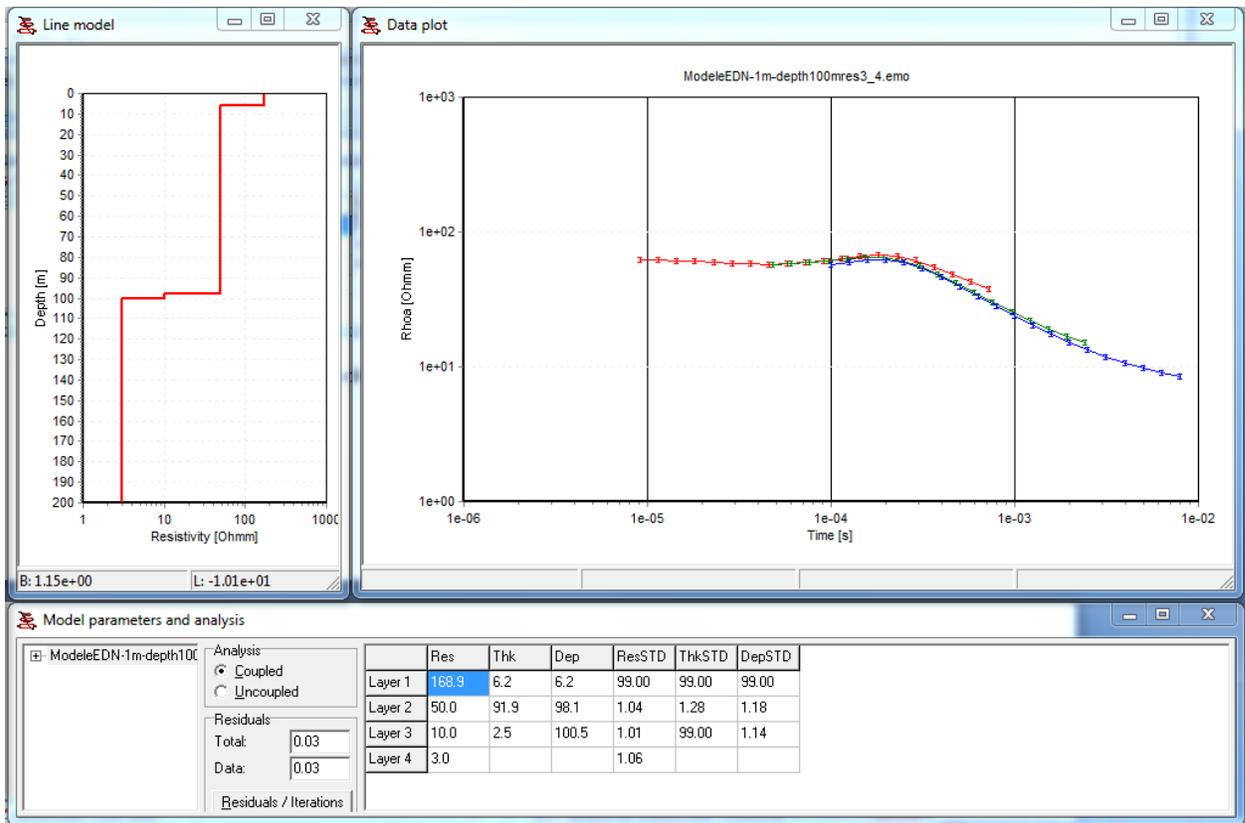


Figure A4-3 : Inversion du modèle EDN h3=1m p3=100 m avec contraintes $\rho_3=10 \Omega.m$

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

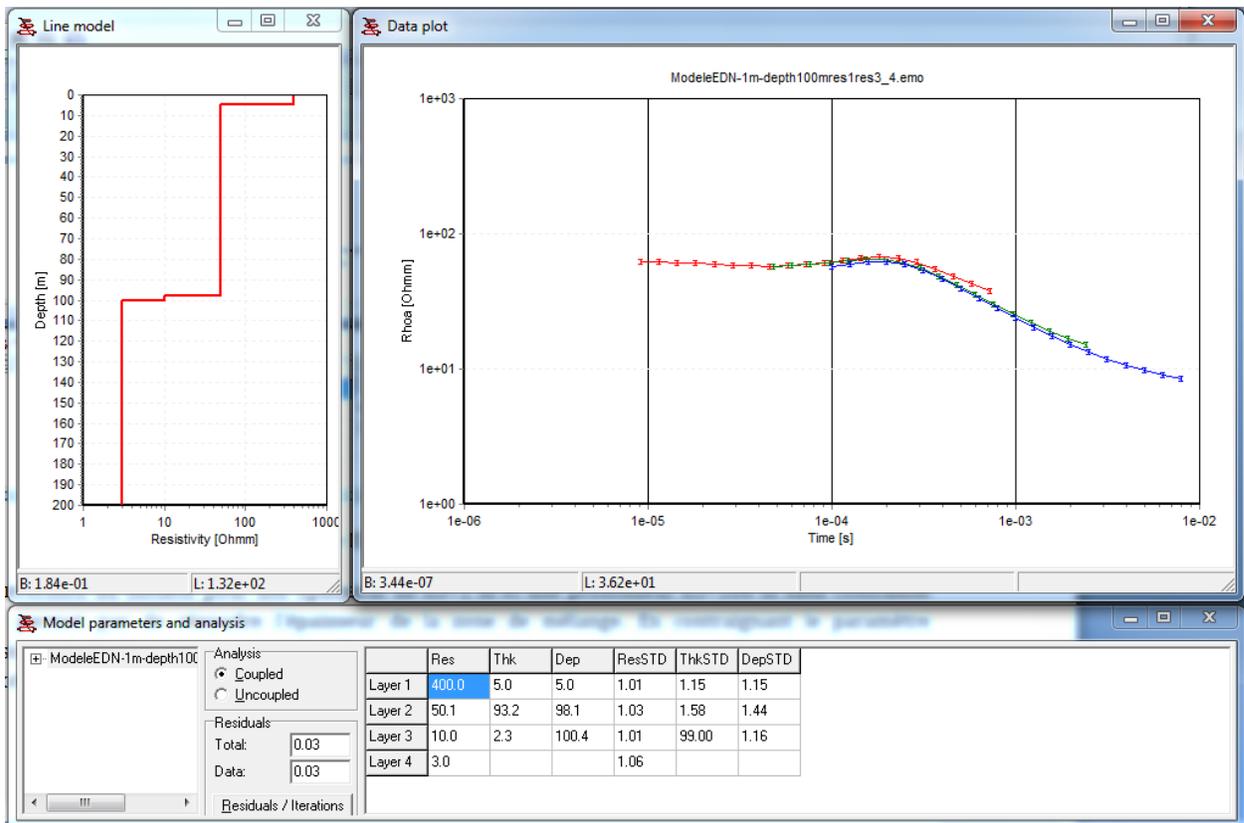


Figure A4-4 : Inversion du modèle EDN $h_3=1\text{m}$ $p_3=100\text{m}$ avec contraintes $p_1=400\ \Omega\cdot\text{m}$, $p_3=10\ \Omega\cdot\text{m}$

L'inversion du modèle pour une épaisseur de la zone de mélange de $h_3=1\ \text{m}$ et une profondeur $h_3 = 100\ \text{m}$ sans contraintes ne nous permet pas de résoudre l'épaisseur de la zone de mélange. Toutefois la profondeur de la nappe saline est relativement bien résolue. En contraignant les paramètres résistivités de la première et la troisième couche l'inversion nous donne une épaisseur de 2.3 m pour une profondeur de 100.4 m, ce qui veut dire que cette épaisseur ne peut être résolue.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

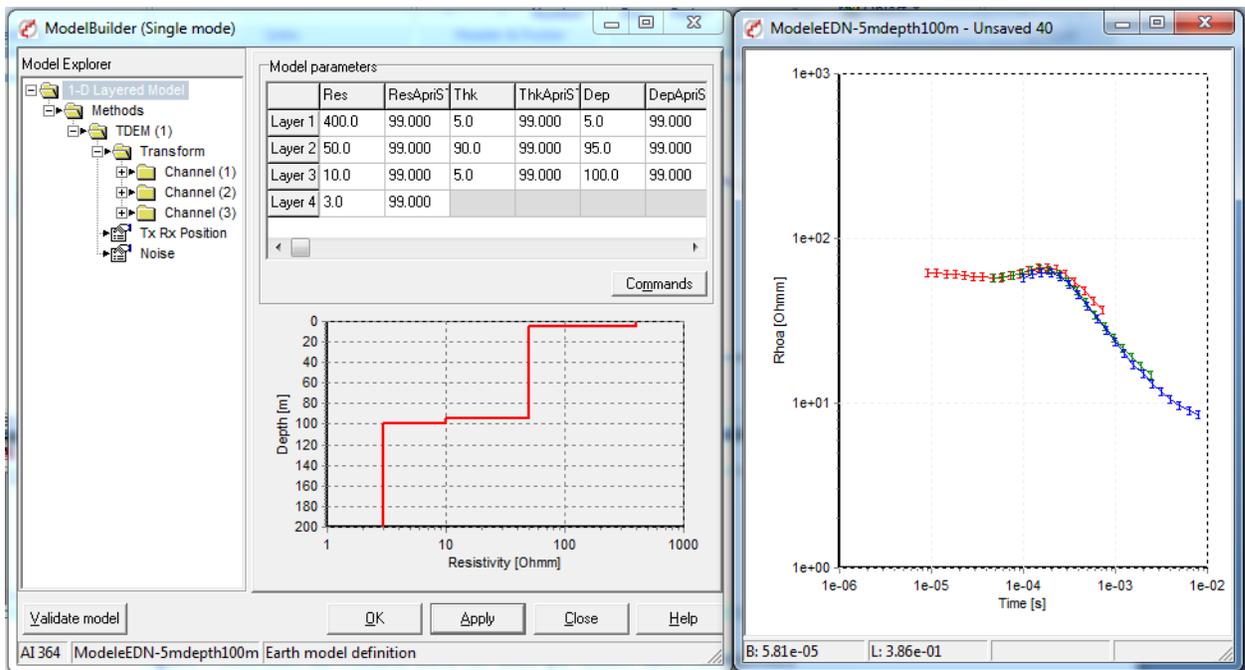


Figure A4-5: Modèle EDN h3=5 m p3=100 m

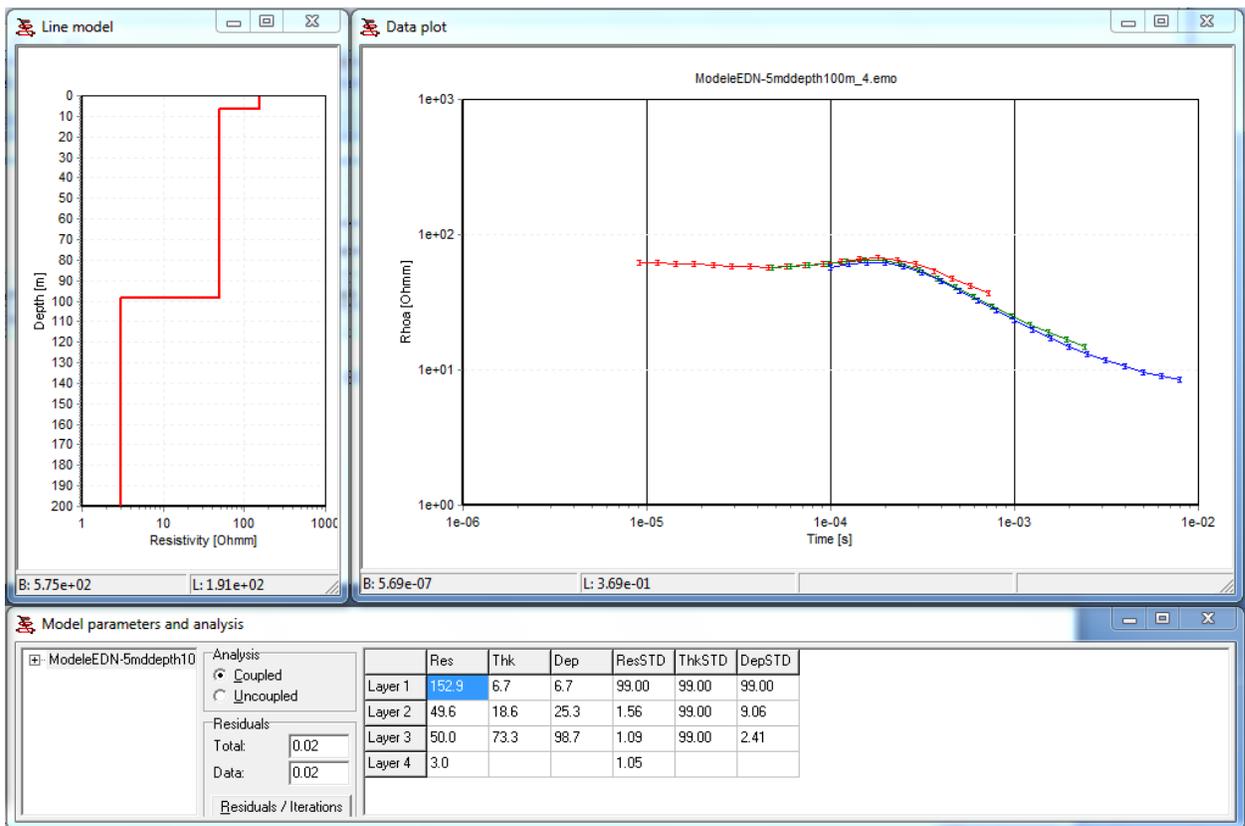


Figure A4-6: Inversion du modèle EDN h3=5 m p3=100 m sans contraintes

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

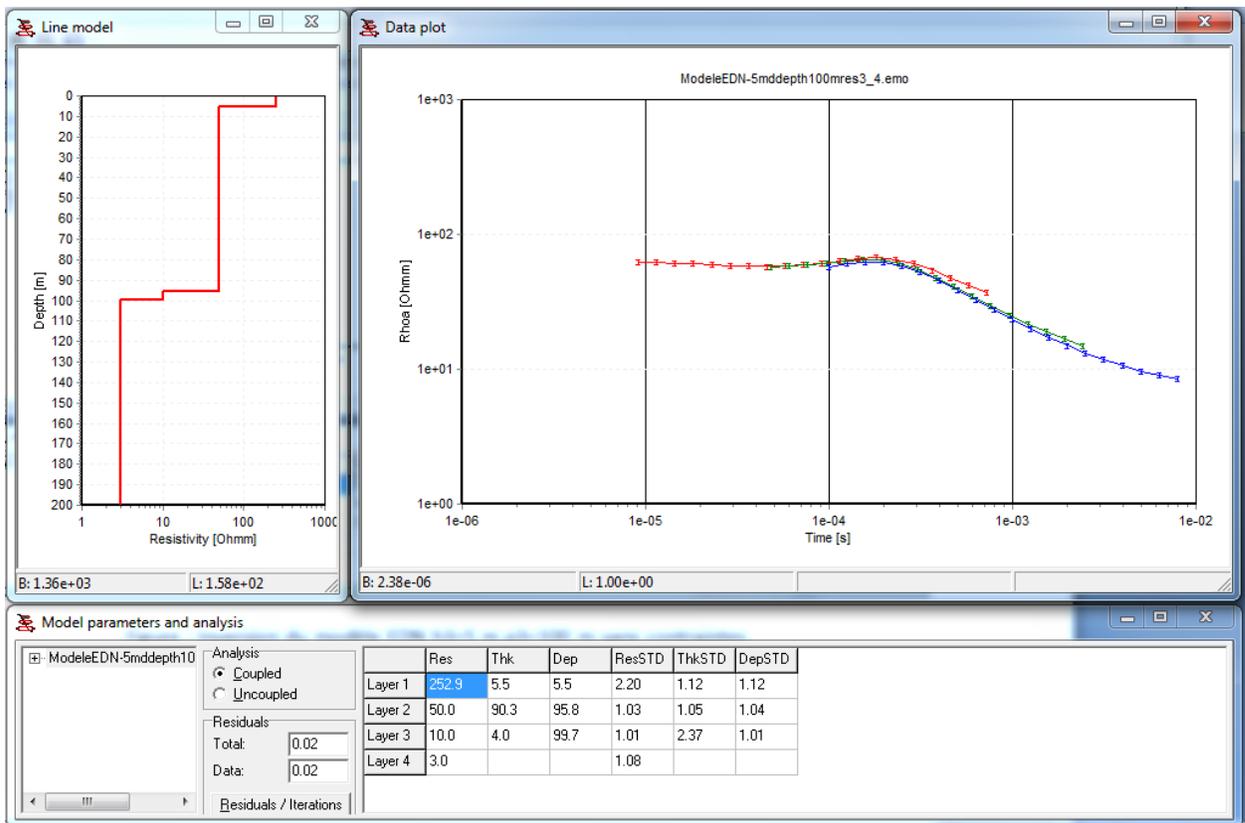


Figure A4-7: Inversion du modèle EDN h3=5 m p3=100 m avec contraintes $\rho_3=10 \Omega.m$

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

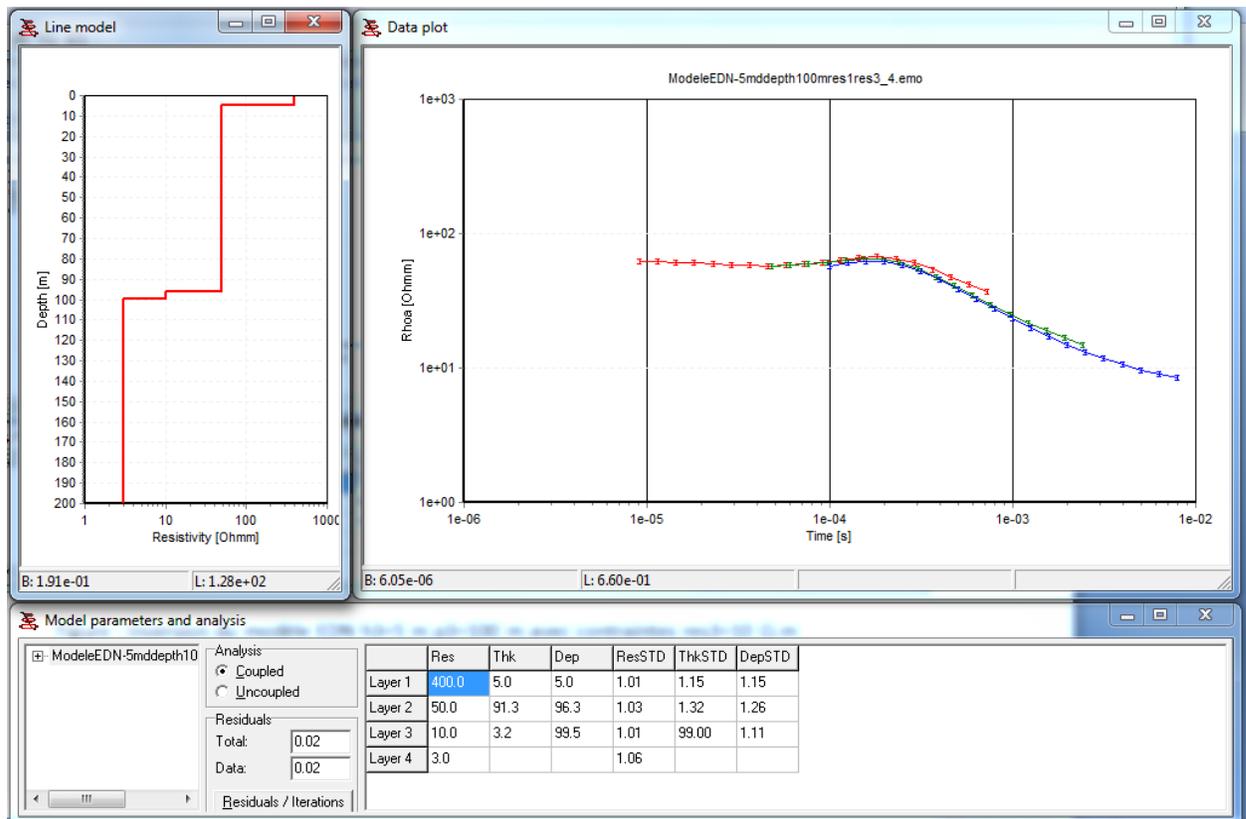


Figure A4-8: Inversion du modèle EDN h3=5 m p3=100 m avec contraintes $p_1=400 \Omega.m$ et $\rho_3=10 \Omega.m$

En augmentant l'épaisseur de la zone de mélange, nous constatons que l'inversion sans contraintes ne résout toujours pas cette épaisseur. Une contrainte sur la résistivité de la troisième couche nous a permis d'estimer l'épaisseur à 4 m et à 3.2 m pour des contraintes de résistivités sur la première et la troisième couche. Il est à noter que la profondeur de la nappe saline se résout bien sans et avec contraintes avec une incertitude 1 % en contraignant p_3 et de 11 % en contraignant p_1 et p_3 .

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

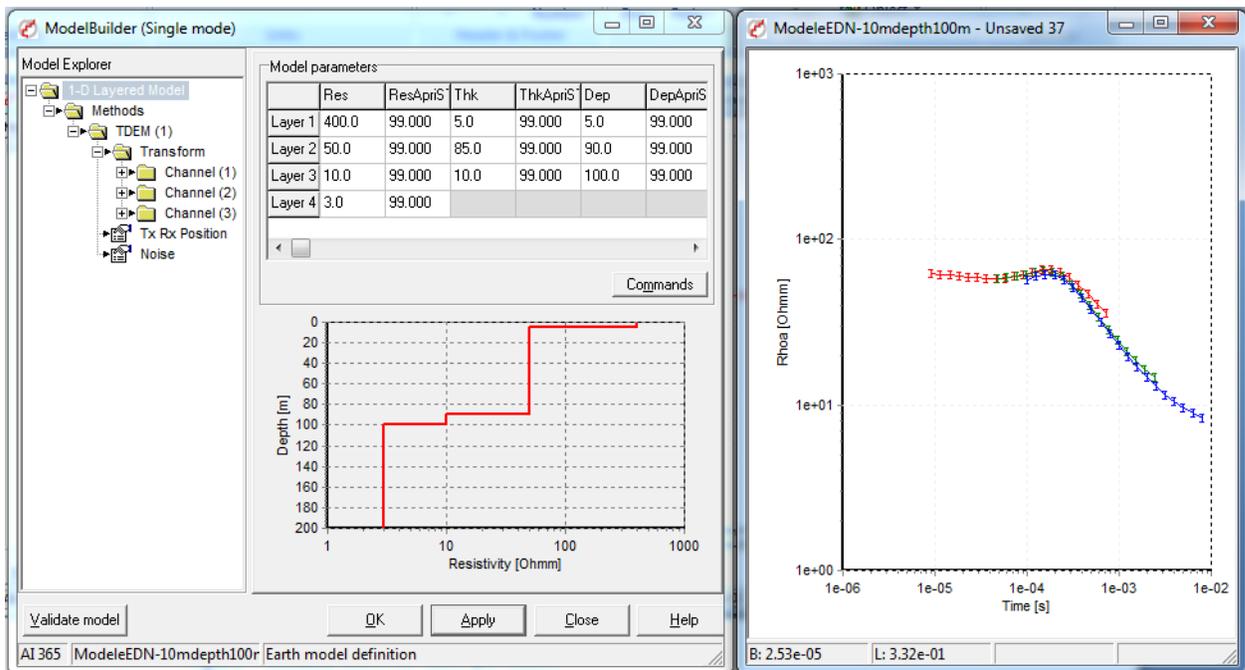


Figure A4-9: Modèle EDN h3=10 m p3=100 m

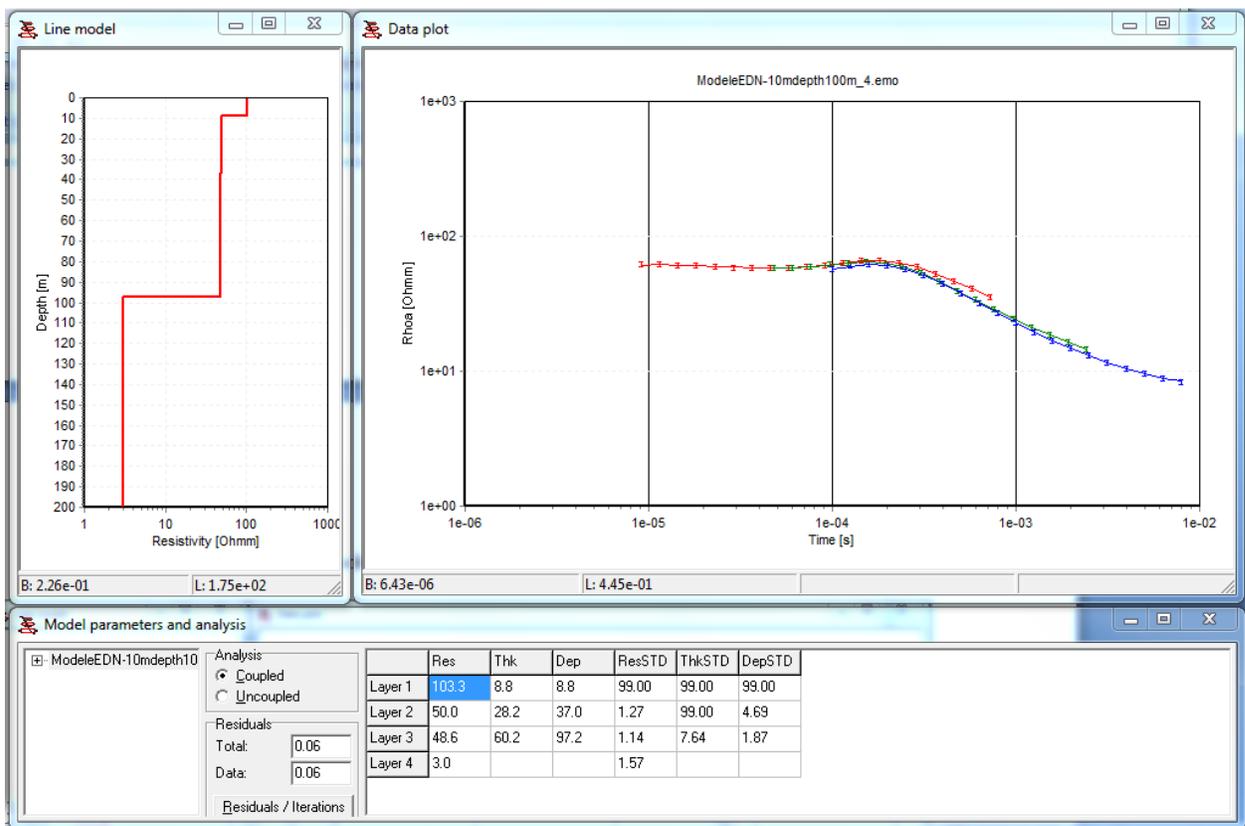


Figure A4-10: Inversion du modèle EDN h3=10m p3=100m sans contraintes

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

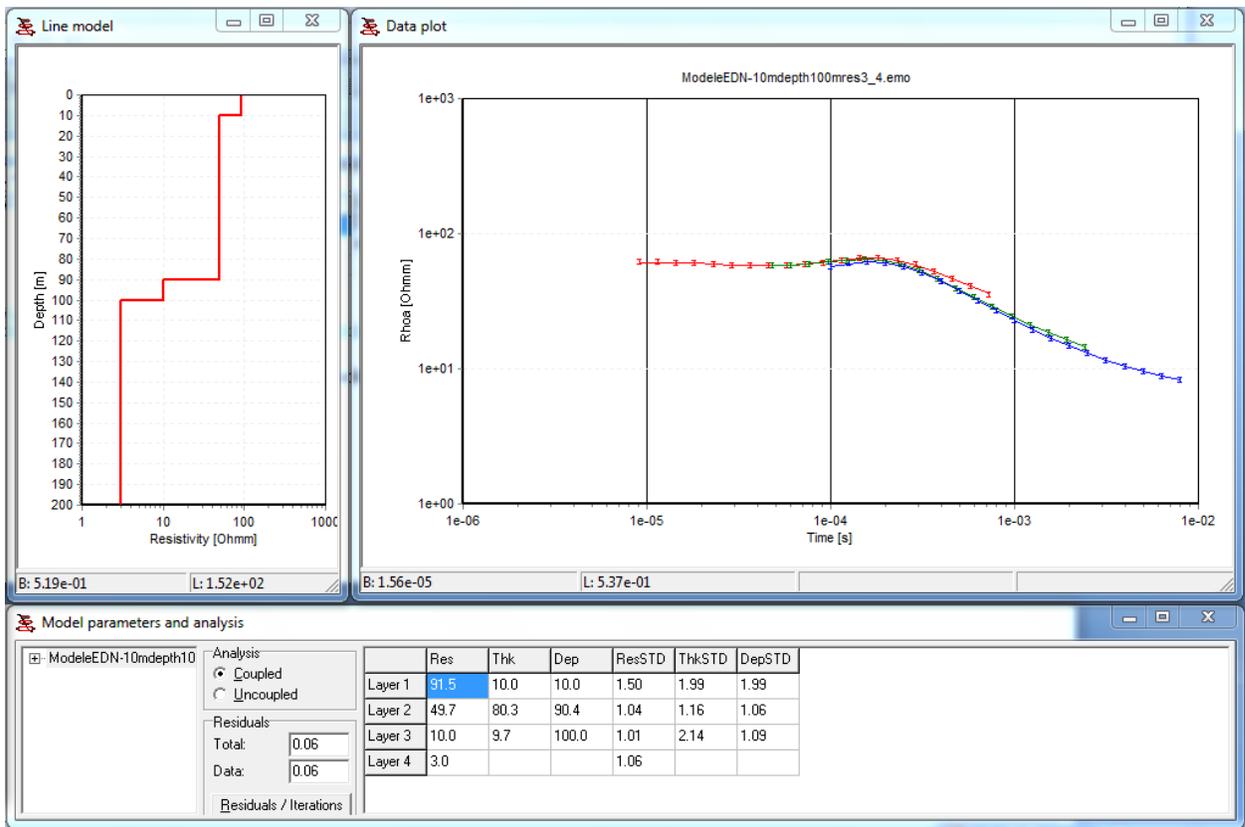


Figure A4-11: Inversion du modèle EDN h3=10m p3=100m avec contraintes p3=10 Ω .m

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

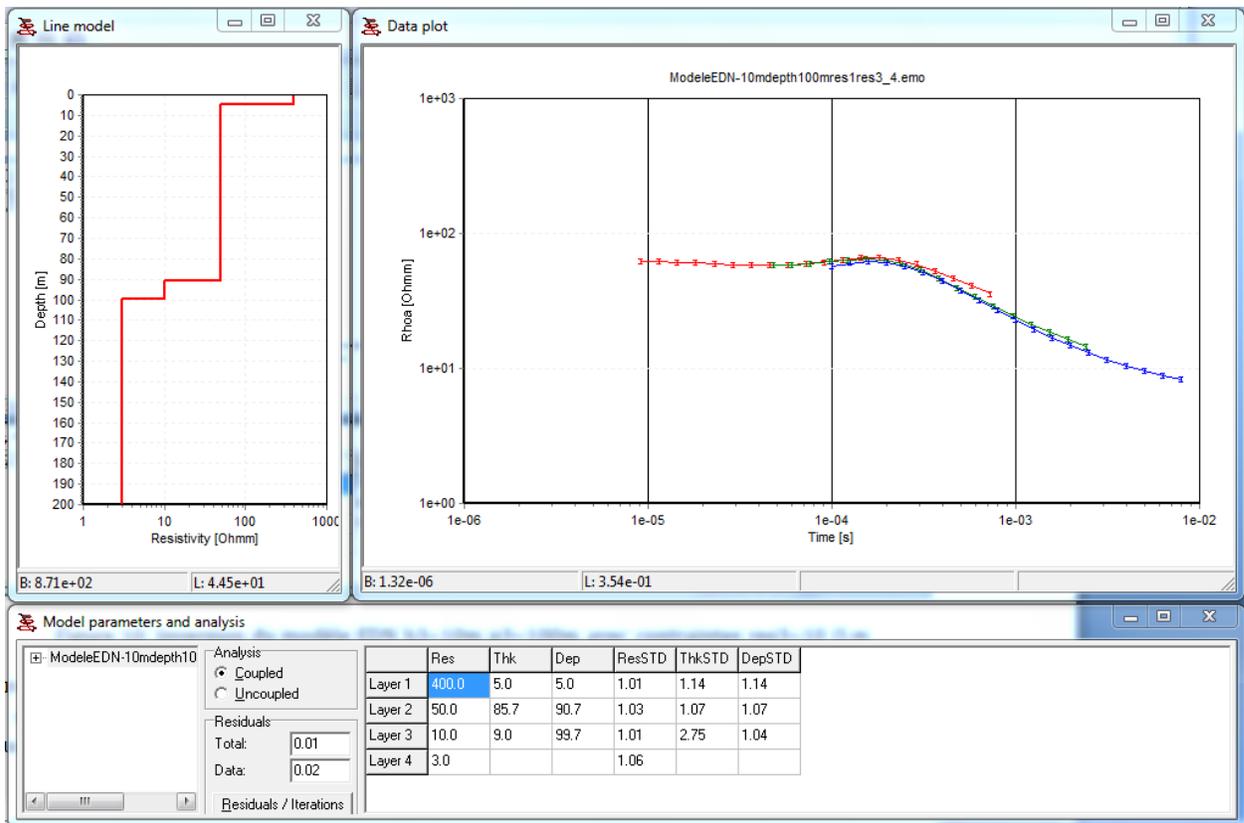


Figure A4-12: Inversion du modèle EDN h3=10m p3=100m avec contraintes $\rho_1=400 \Omega.m$ $\rho_3=10 \Omega.m$

L'inversion sans contraintes des données modélisées pour une épaisseur de la zone de mélange de 10 m ne permet pas de résoudre celle-ci. En contraignant par contre la résistivité de la troisième couche nous avons obtenu une épaisseur de 9.7 m et une épaisseur de 9 m pour des contraintes de résistivités sur la première et la deuxième couche. La profondeur de la nappe saline a une résolution optimale (100m) en contraignant seulement la résistivité de la troisième couche ρ_3 .

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

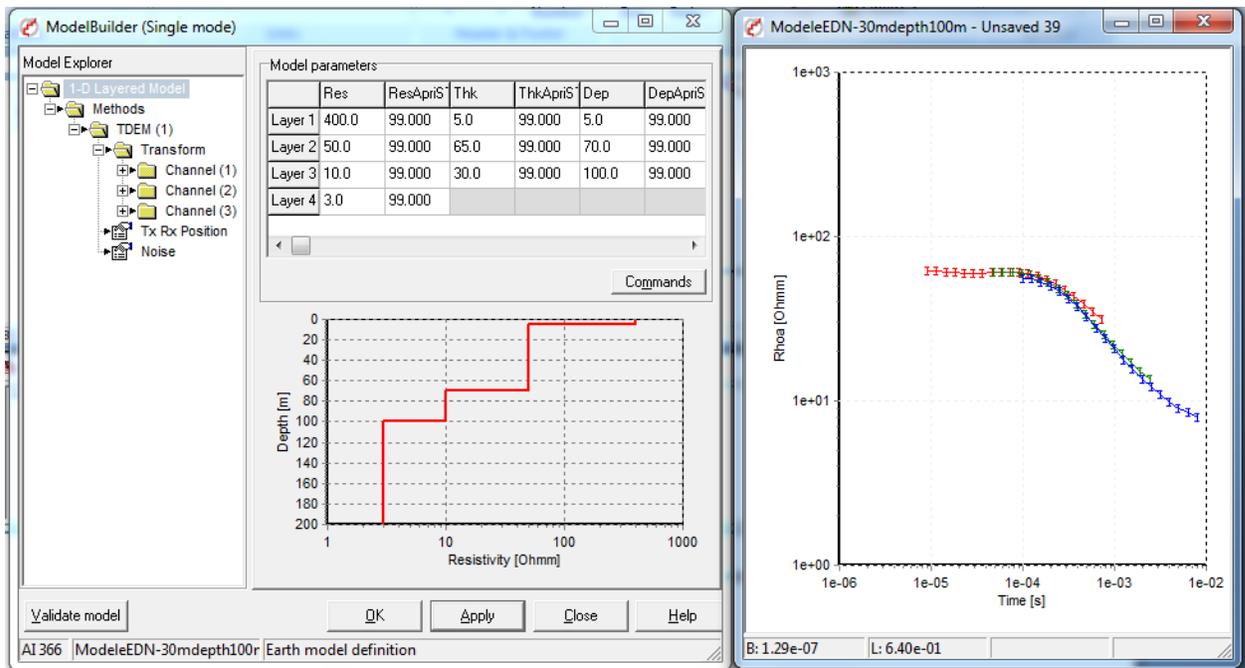


Figure A4-13: Modèle EDN h3=30 m p3=100 m

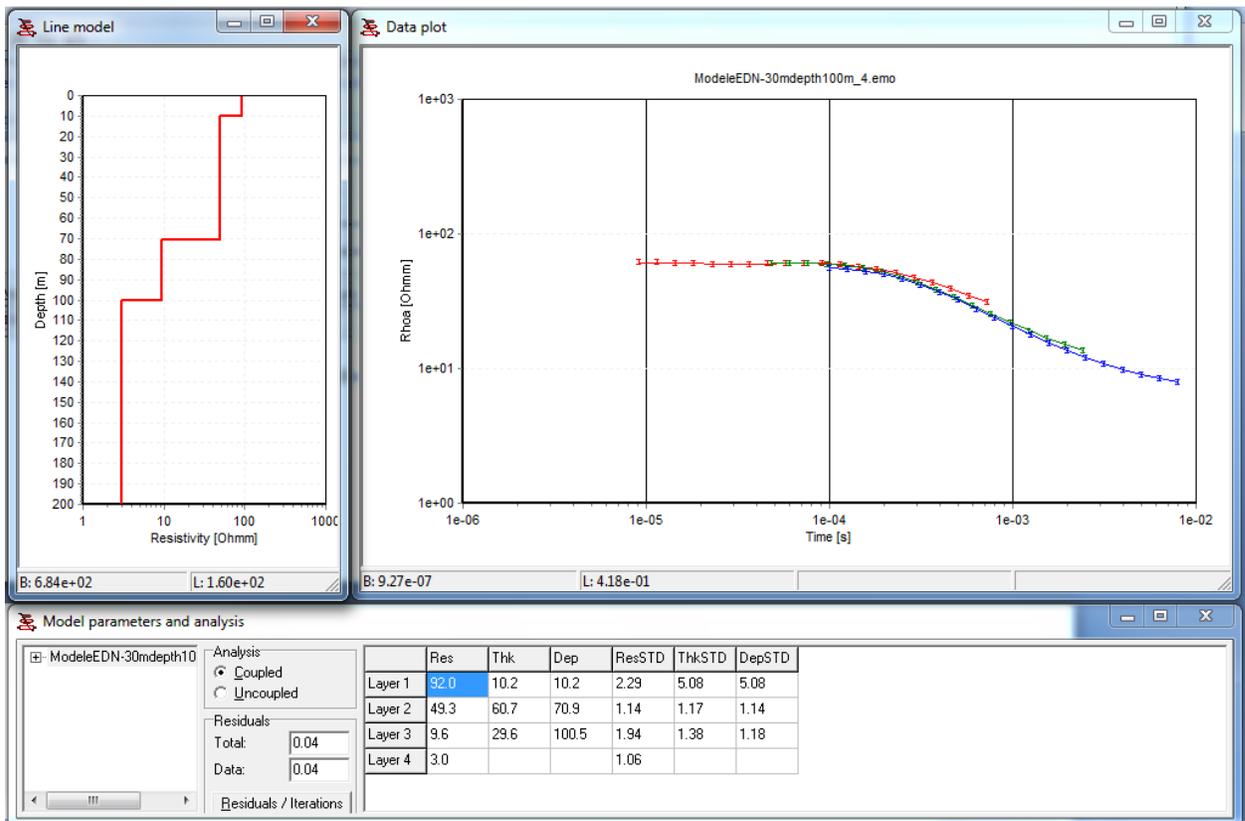


Figure A4-14: Inversion du modèle EDN h3=30m p3=100m sans contraintes

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

Le résultat de l'inversion du modèle de la zone de mélange d'une épaisseur de 30 m pour une profondeur de la nappe saline de 100 m nous montre que cette épaisseur se résout bien sans contraintes. Nous avons obtenus une résistivité 9.6 Ω .m sur la 3ème couche et 29.6 m d'épaisseur. L'inversion des données modélisée estime la profondeur de la nappe saline à 100.5 m avec une incertitude de 18 % ce qui nous montre que ce paramètre est bien résolue.

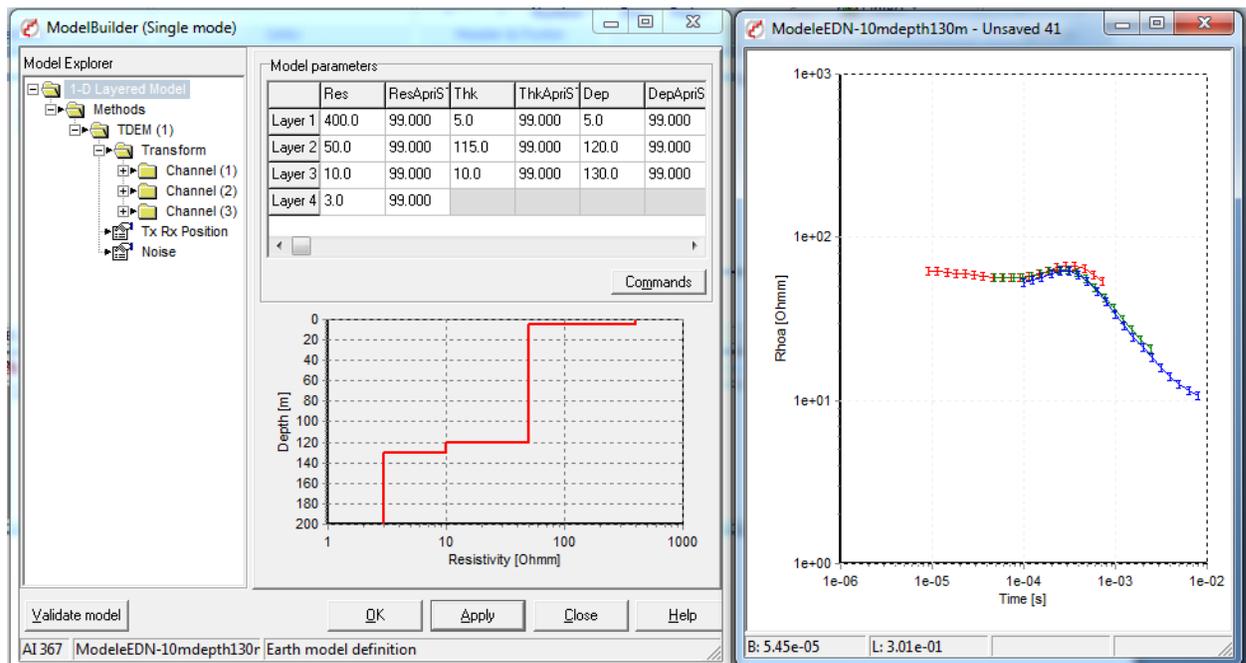


Figure A4-15: Modèle EDN h3=10 m p3=130 m avec erreur relative constante (5%)

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

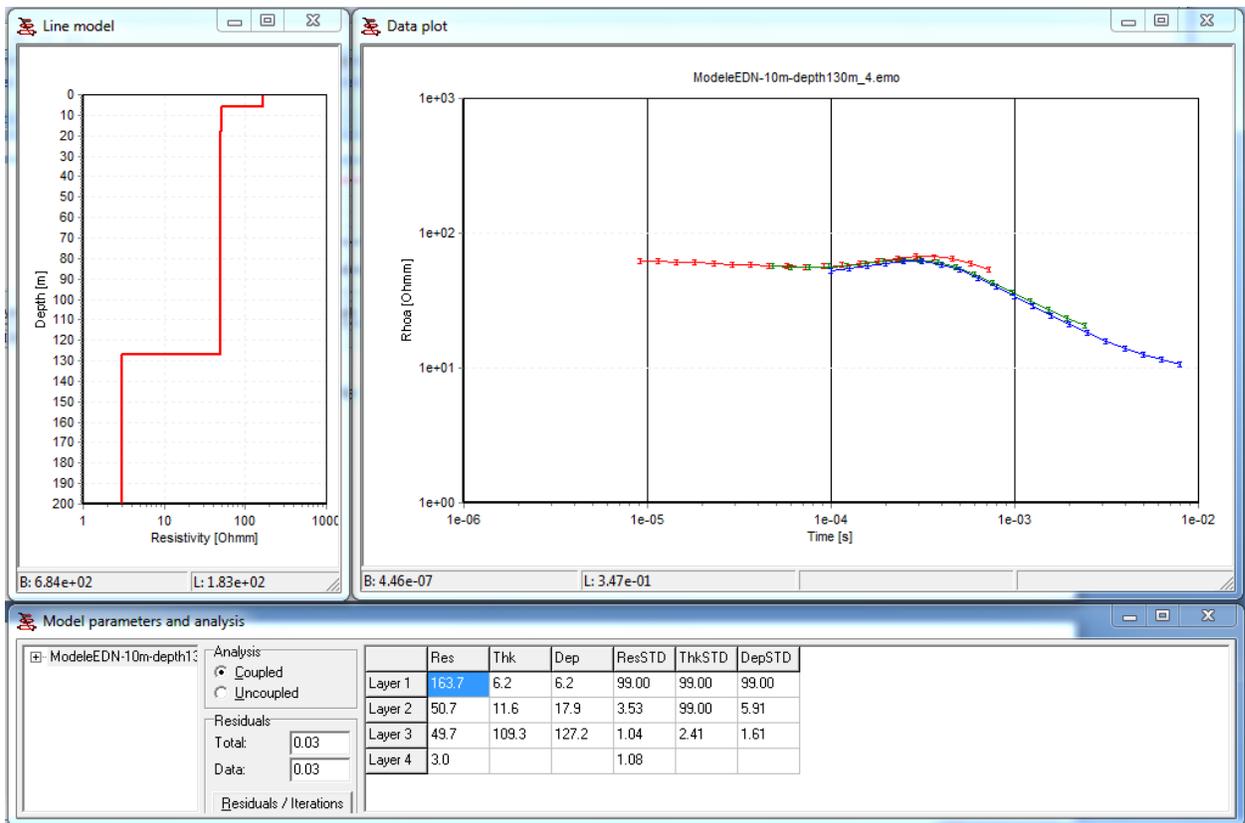


Figure A4-16: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=130 m sans contraintes

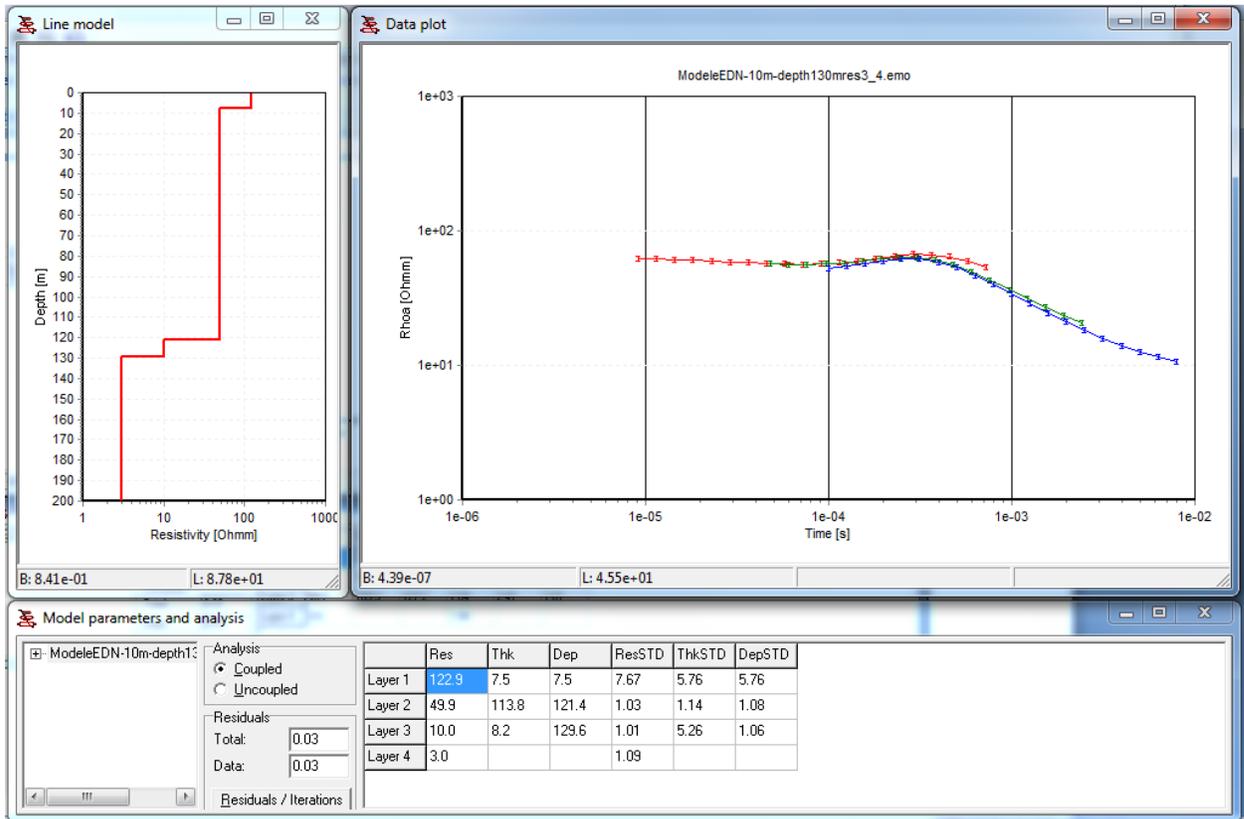


Figure A4-17: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=130 m avec contrainte $\rho_3=10 \Omega.m$

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

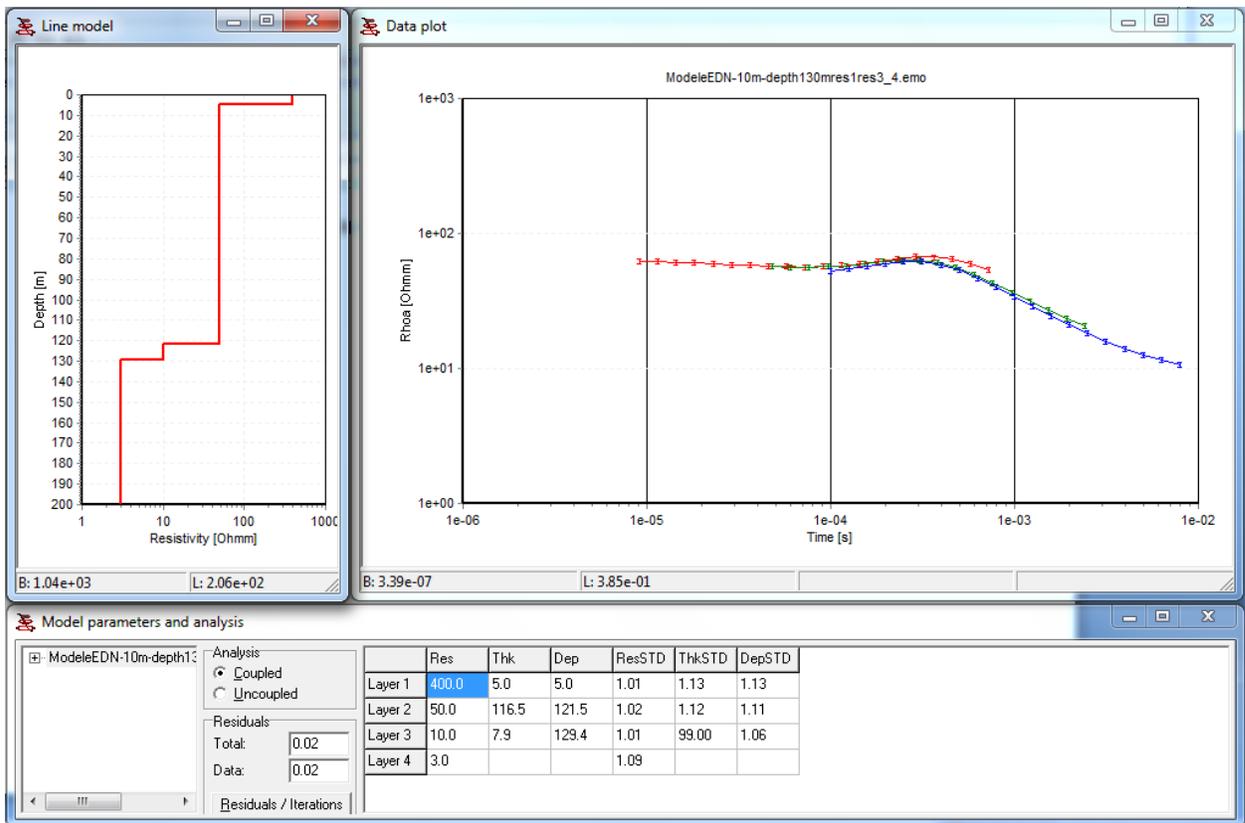


Figure A4-18: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=130 m avec contraintes $p_1=400 \Omega.m$ $p_3=10 \Omega.m$

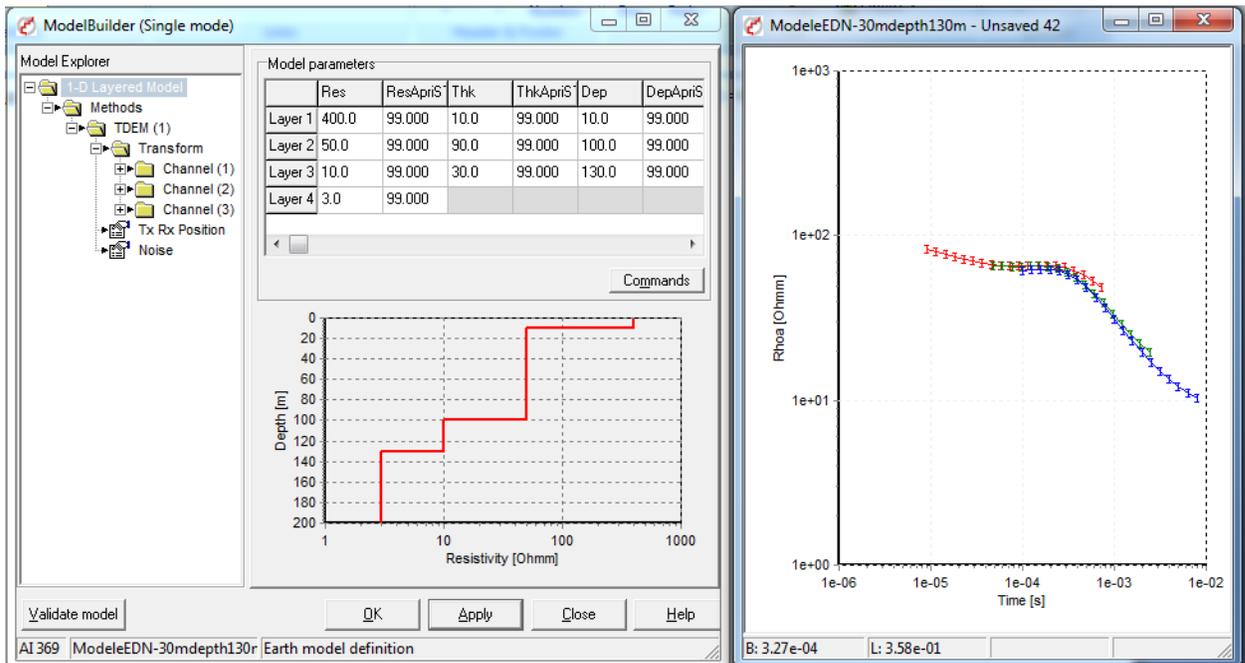


Figure A4-19: Modèle EDN h3=30 m p3=130 m

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

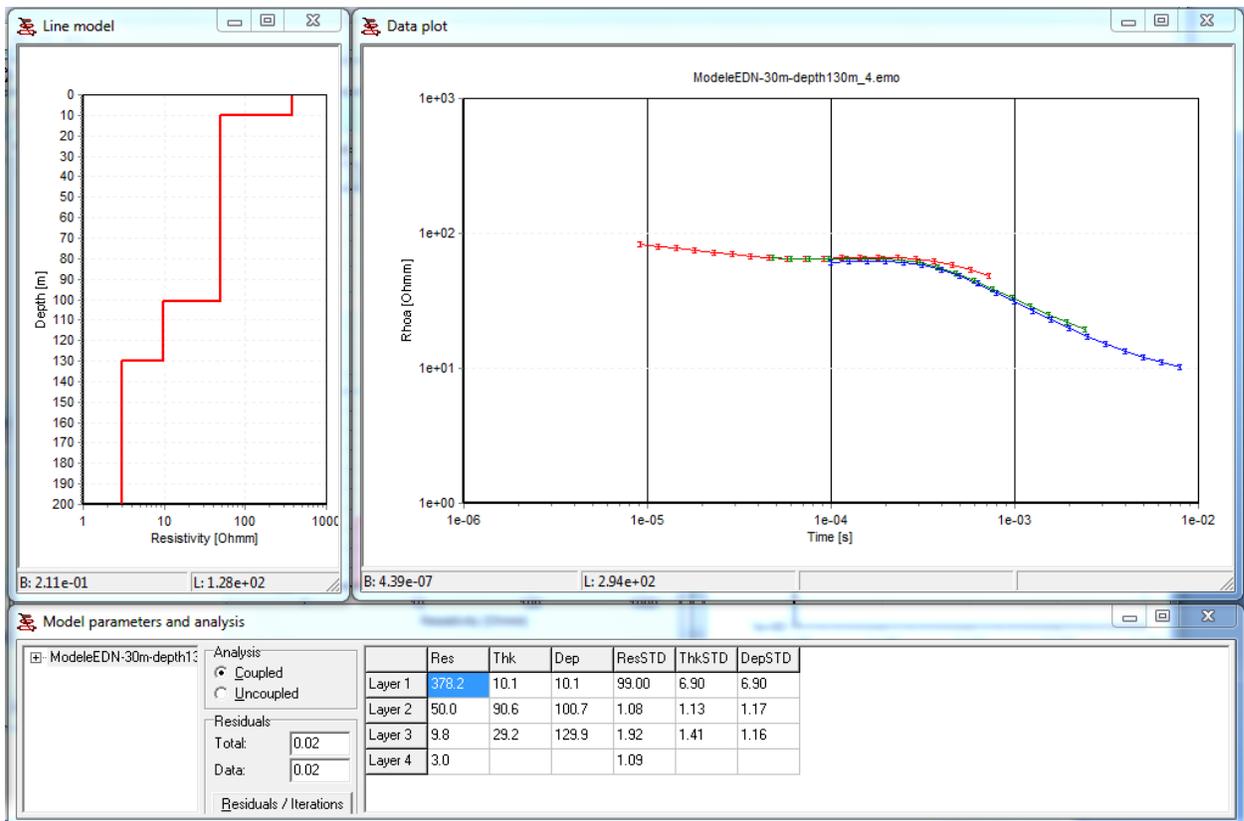


Figure A4-20: Inversion du modèle EDN h3=30 m p3=130 m sans contraintes

L'inversion sans contraintes du modèle avec une épaisseur de 10 m pour une profondeur de la nappe saline de 130 m ne nous permet pas de résoudre nos paramètres épaisseur et résistivité de la troisième couche. Nous constatons une estimation de la profondeur de la nappe saline de 127.2 m. En contraignant la résistivité ρ_3 de la troisième couche nous avons obtenus une épaisseur de 8.2 m. La résolution de cette couche a toutefois diminué (7.9 m) en contraignant les résistivités de la première et de la troisième couche. La profondeur de la nappe saline obtenue après inversion par une contrainte de résistivité de la troisième couche est de 129.6 m et est de 129.4 m avec des contraintes de résistivité sur la première et troisième couche ce qui représente une bonne estimation de la profondeur. En augmentant l'épaisseur de la zone de transition à 30 m, l'inversion sans contraintes nous a permis de résoudre relativement bien cette dernière (29.2 m) pour une résistivité de 9.8 $\Omega \cdot m$ et une profondeur de la nappe saline de 129.9 m.

Modélisation et Inversion avec bruit comparable aux données réelles
Niveau de bruit Étang-du-Nord

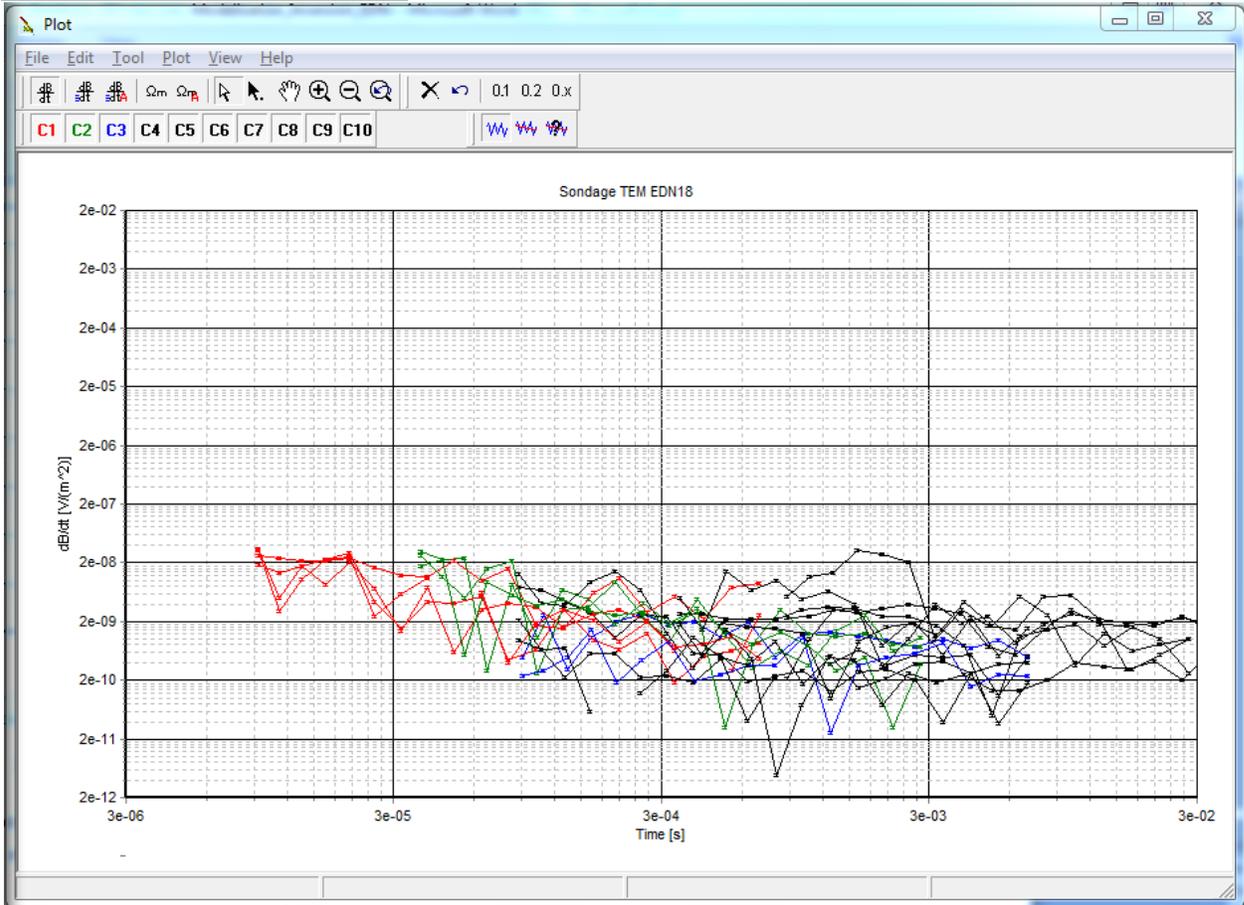


Figure A4-21: Superposition des bruits enregistrés sur les sondages ETAN18, ETAN19 et ETAN20

La figure A4-21 montre le niveau de bruit sur les sondages TEM EDN18, EDN19 et EDN20, ce dernier varie autour de $2.03 \cdot 10^{-8} \text{ V/m}^2$ et $3.68 \cdot 10^{-11} \text{ V/m}^2$ à partir du temps de 1 ms. Il est à noter que la pente du bruit est très faible.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

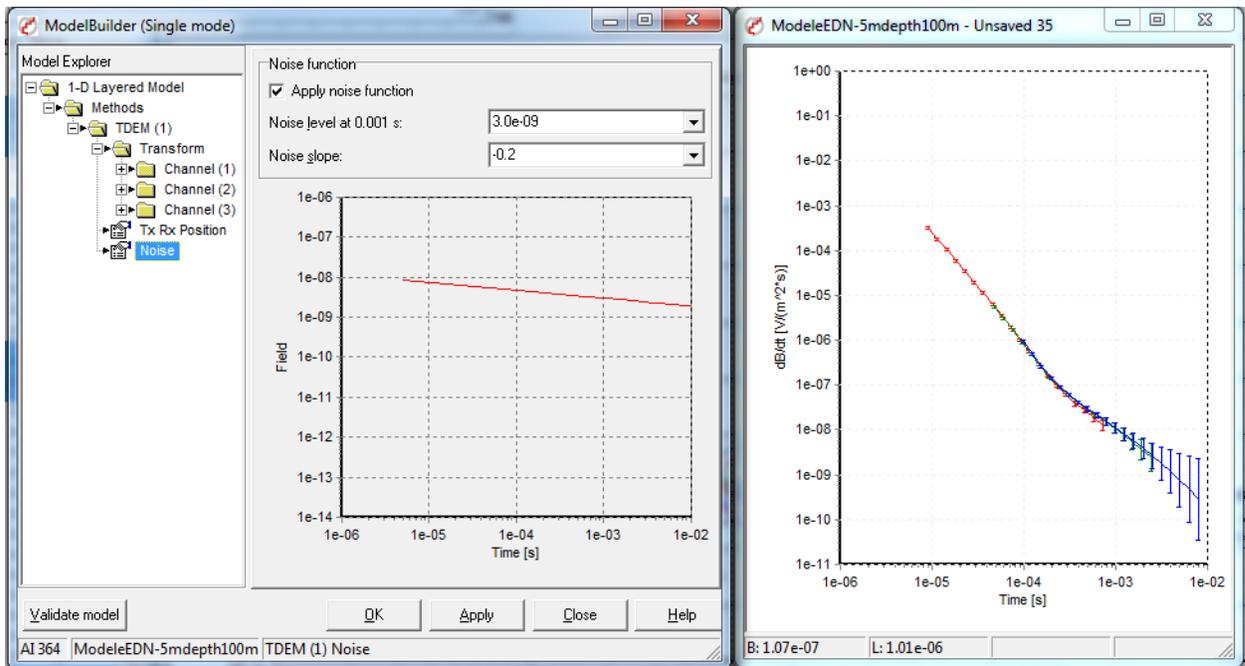


Figure A4-22: Modèle EDN h3=5m p3=100m avec bruit de 3nV/m²

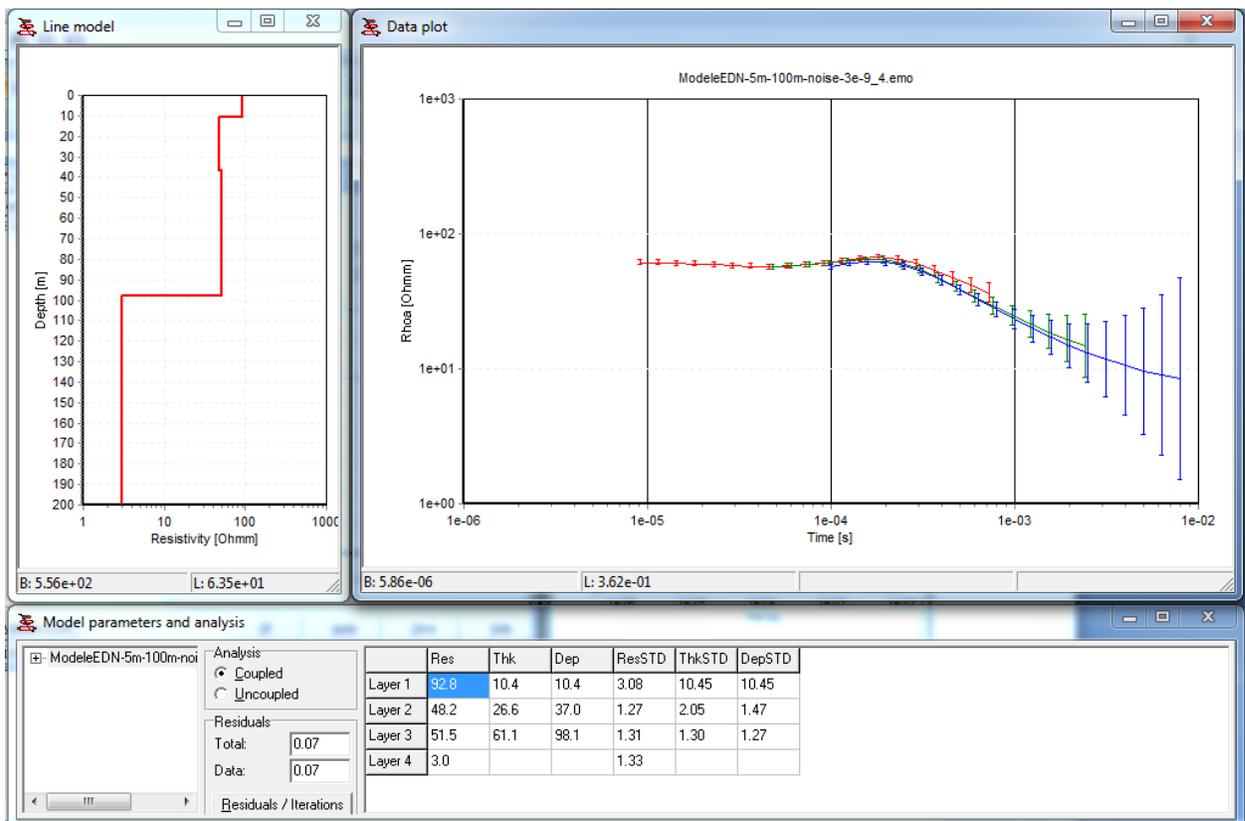


Figure A4-23: Inversion du modèle EDN h3=5 m p3=100 m sans contraintes avec bruit de 3 nV/m²

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

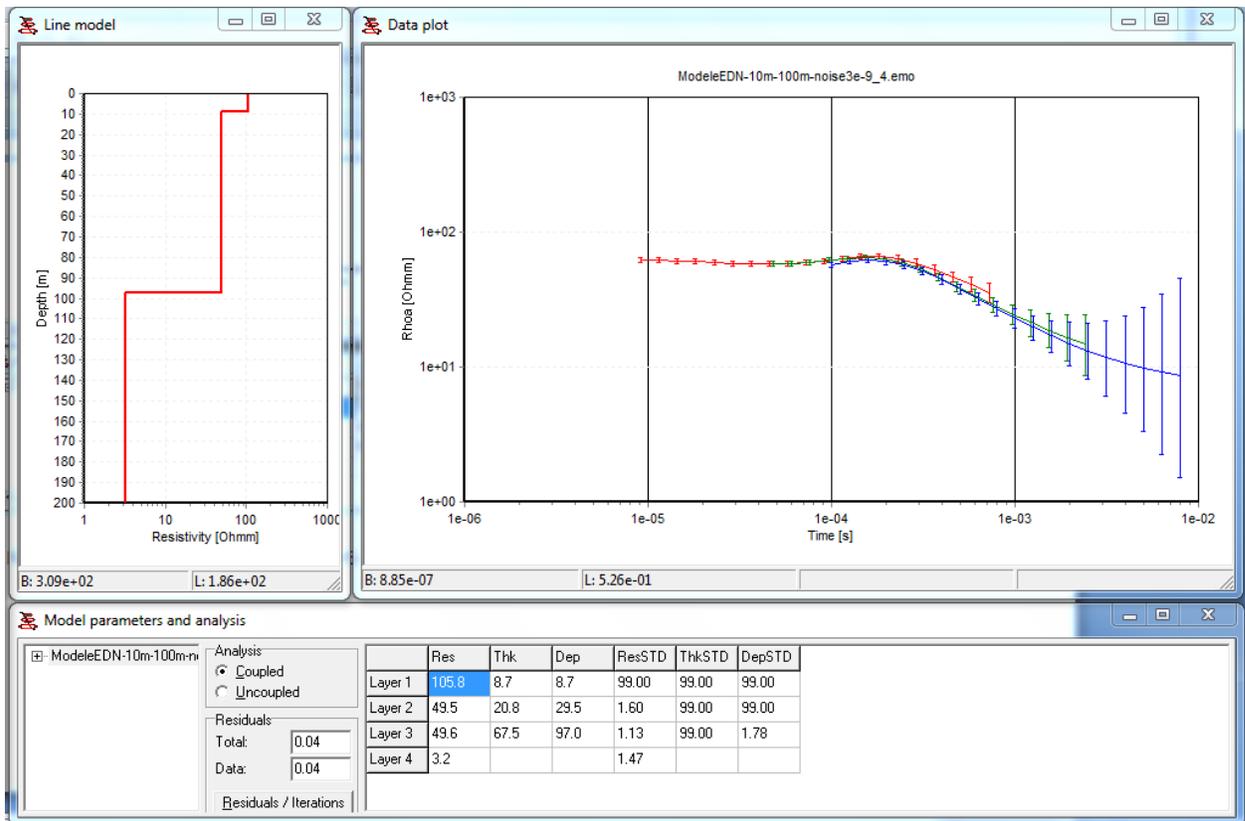


Figure A4-24: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=100 m sans contraintes avec bruit de 3 nV/m²

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

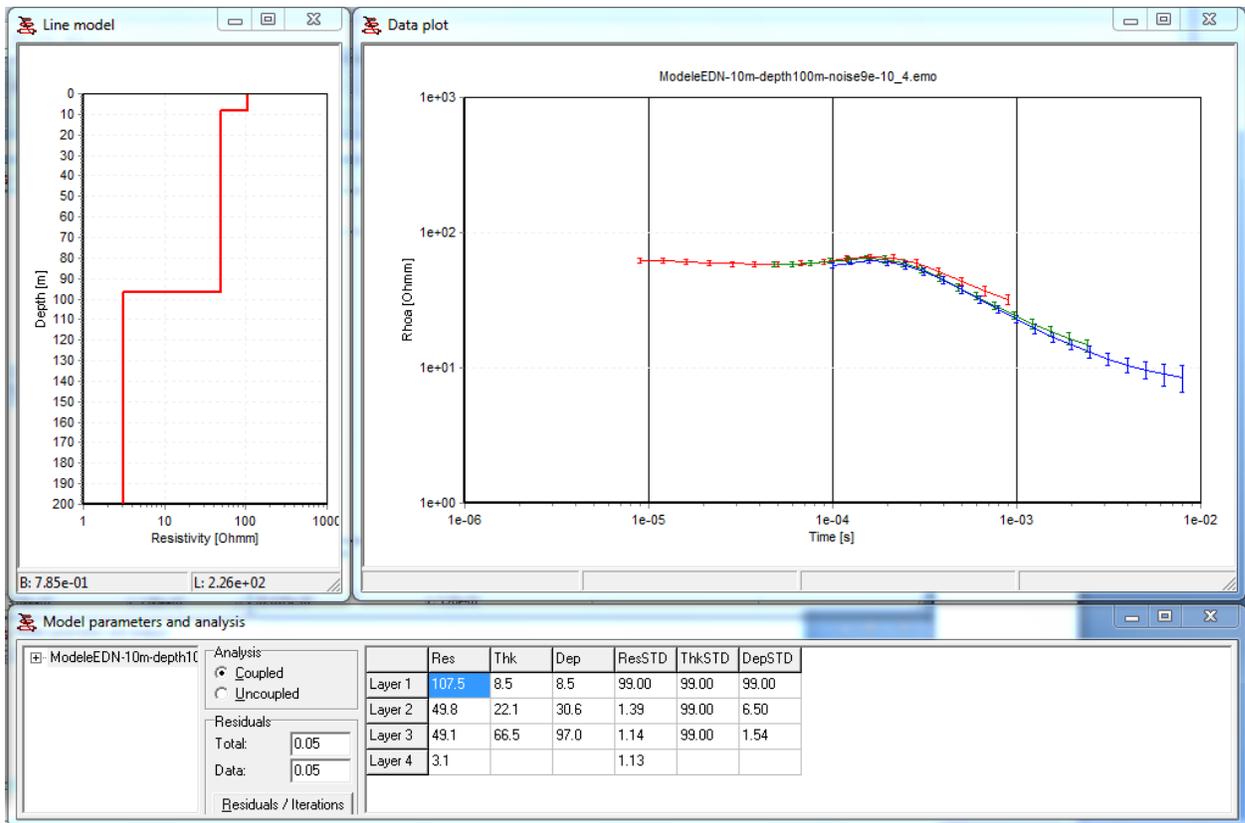


Figure A4-25 : Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=100 m sans contraintes avec bruit de 0.9 nV/m^2

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

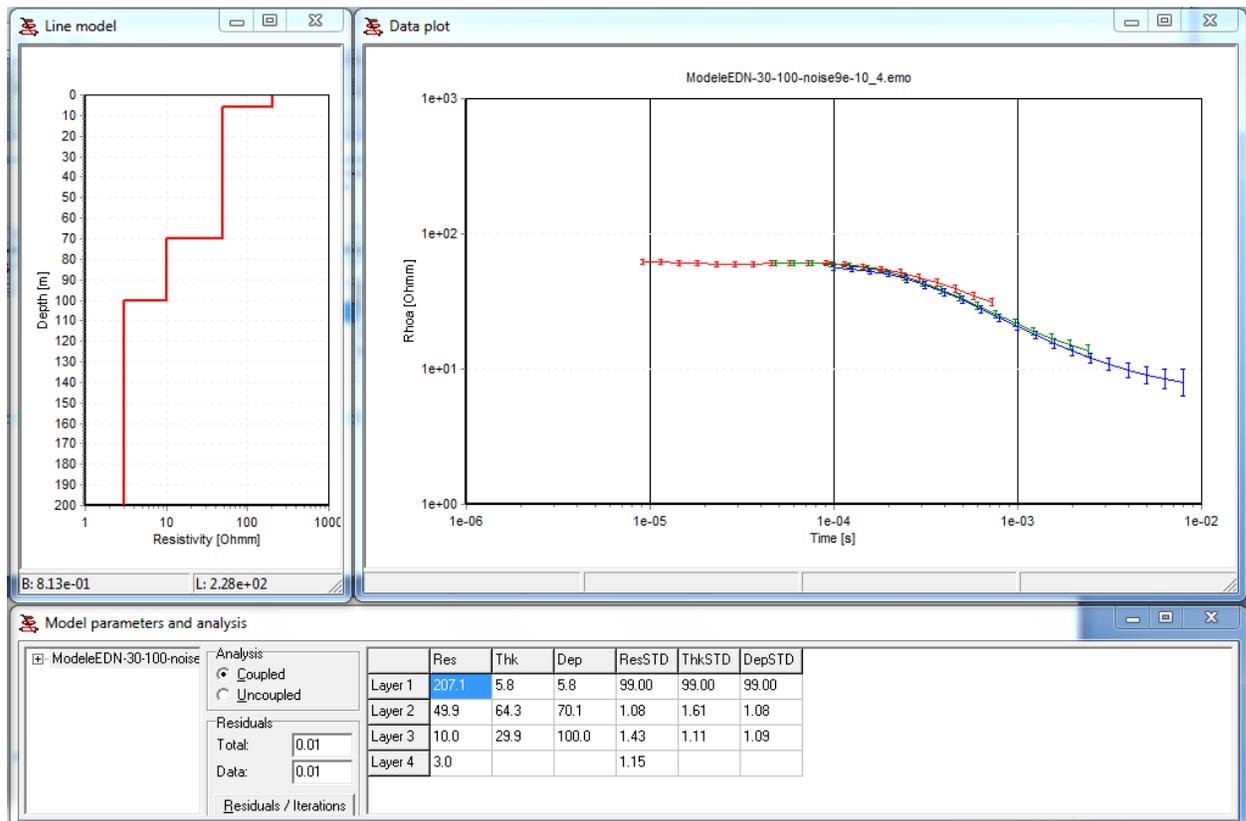


Figure A4-26: Inversion du modèle EDN $h_3=30$ m $p_3=100$ m sans contraintes avec bruit de 0.9 nV/m^2

L'inversion des données TDEM modélisée à Etang-du-Nord pour une épaisseur de 10m de la zone de mélange avec un niveau de bruit de 3 nV/m^2 et 0.9 nV/m^2 ne résout pas cette dernière. Nous avons toutefois constaté que l'inversion a produit une résolution optimale de la résistivité $p_3=10 \text{ } \Omega.m$ et une relative amélioration de l'épaisseur de la zone de mélange $h_3=29.9$ m en ajoutant un bruit de 0.9 nV/m^2 pour une $h_3=30$ m et une profondeur de la nappe saline de 100 m qui d'ailleurs a été estimée de façon optimale.

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

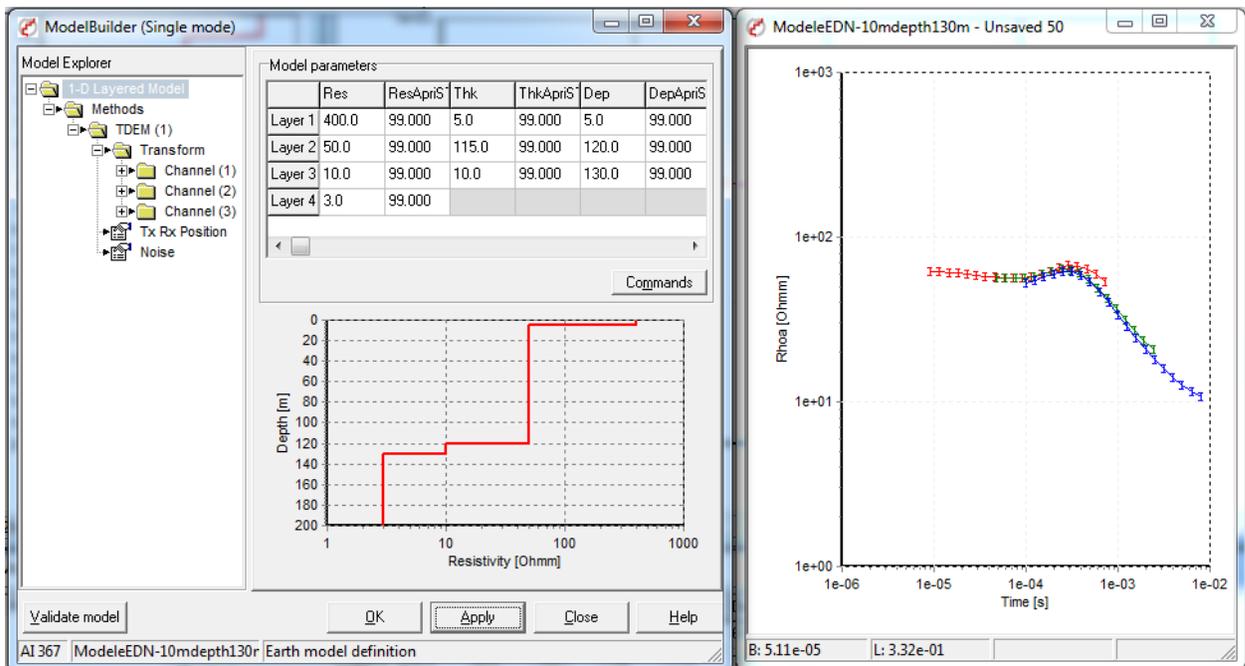


Figure A4-27: Modèle EDN h3=10 m p3=130 m avec erreur relative constante

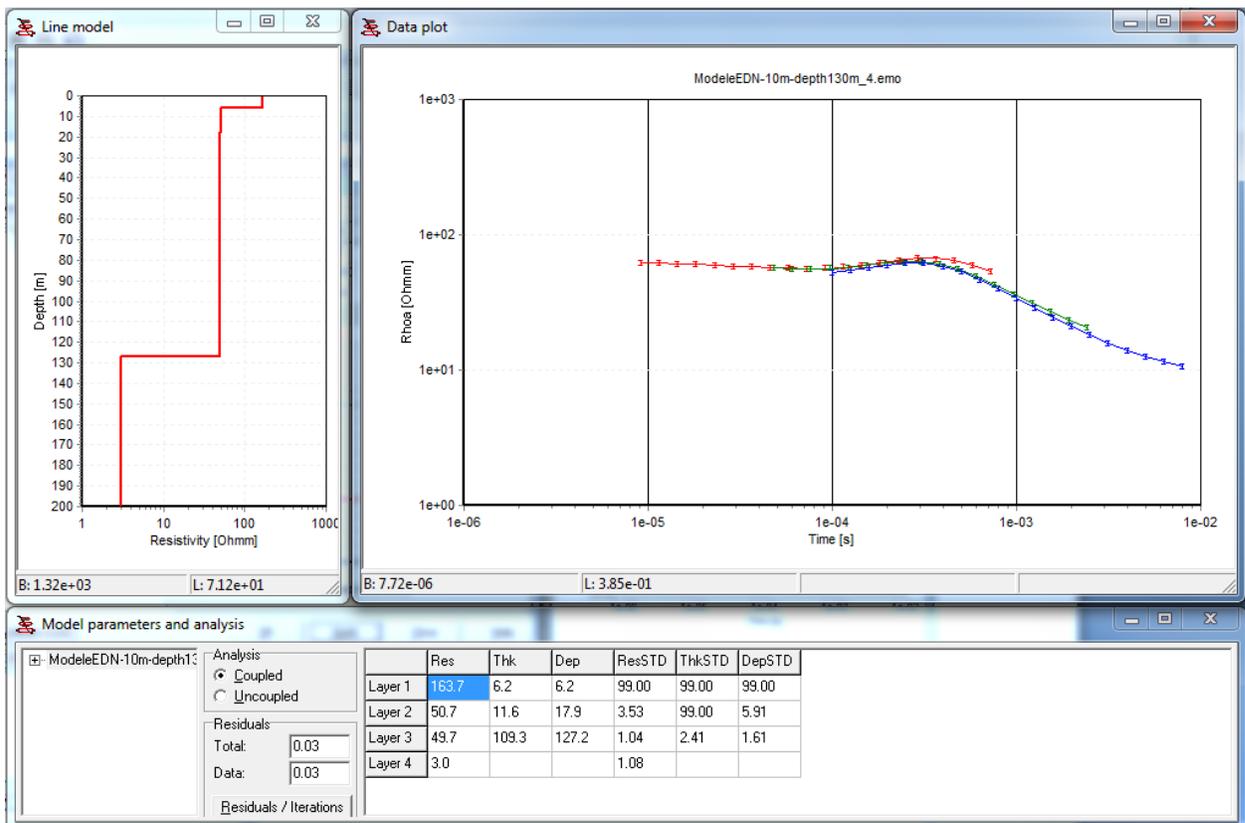


Figure A4-28: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=130 m sans contraintes avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

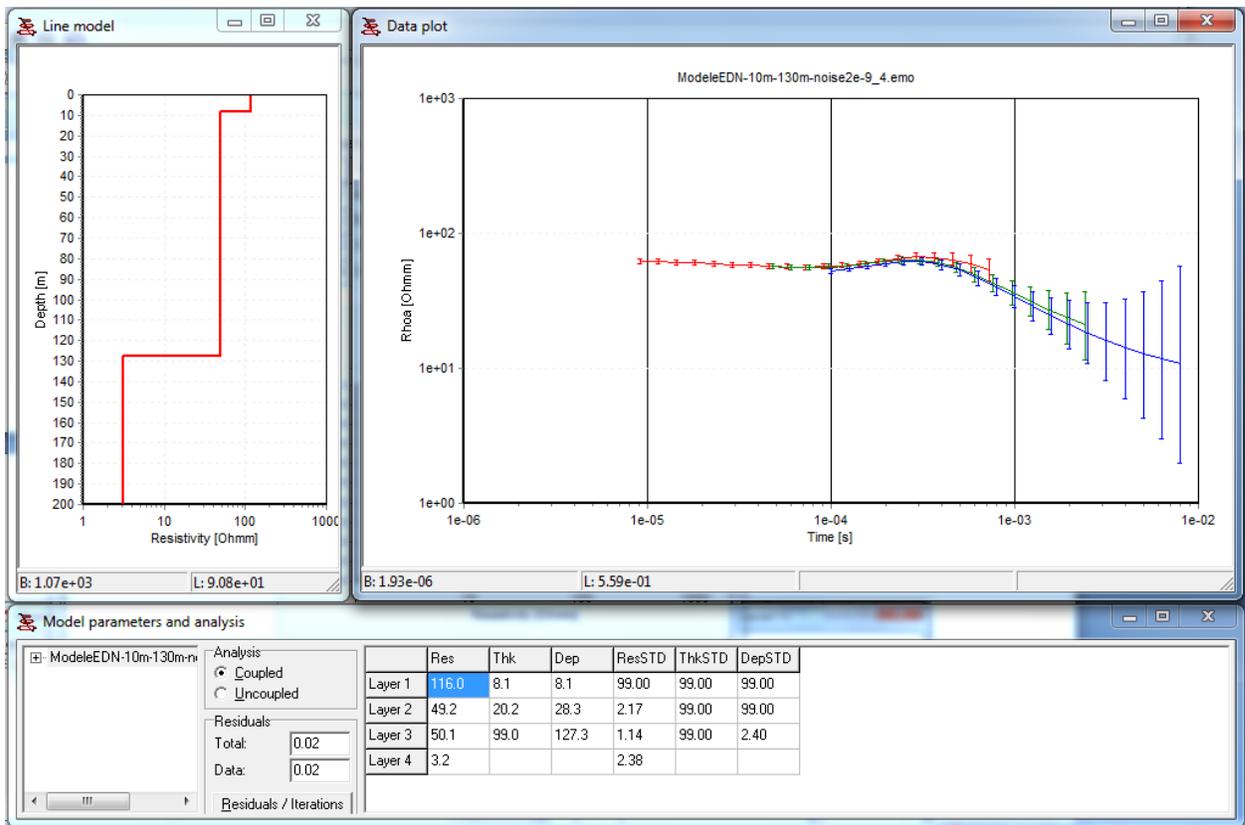


Figure A4-29: Inversion du modèle EDN h3=10 m p3=130 m sans contraintes avec bruit de $3nV/m^2$

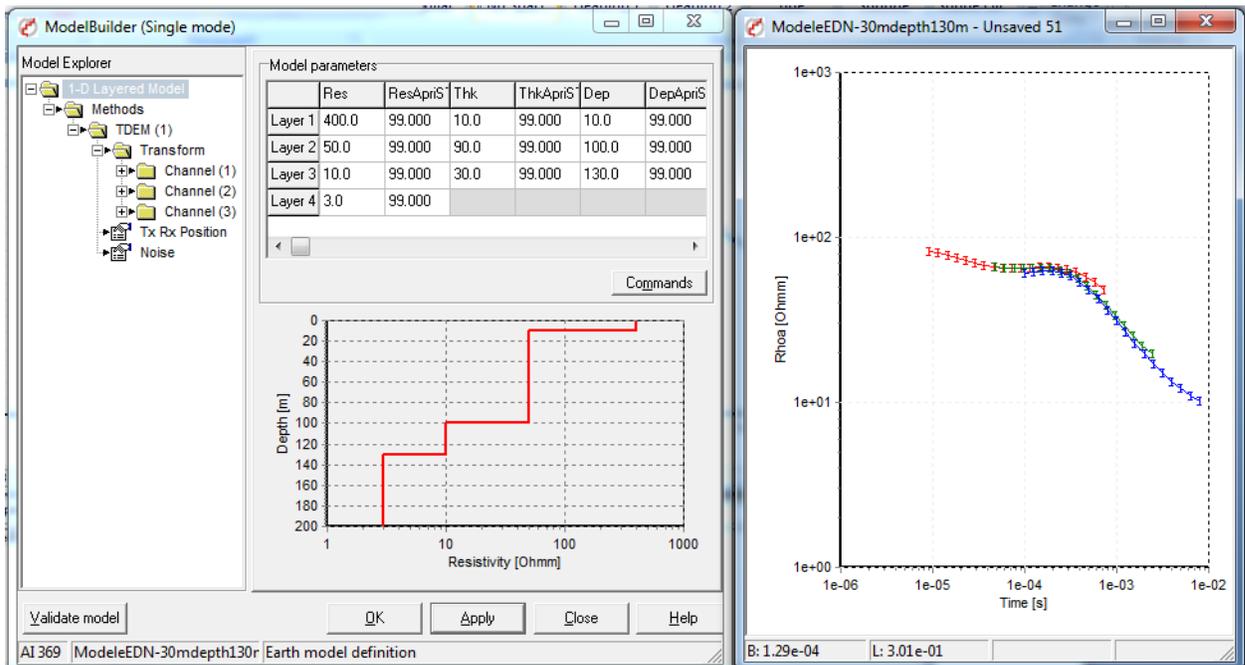


Figure A4-30: Modèle EDN h3=30 m p3=130 m avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

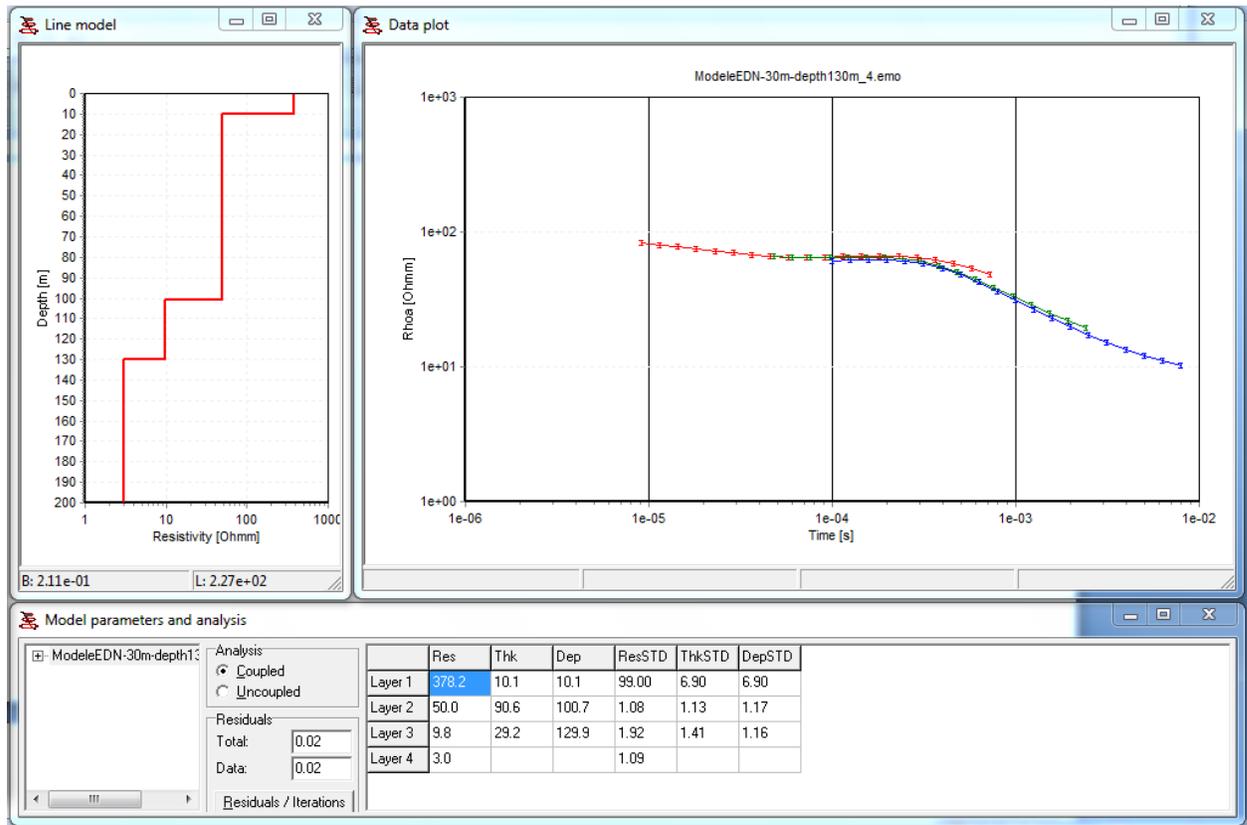


Figure A4-31: Inversion du modèle EDN h3=30 m p3=130 m sans contraintes avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

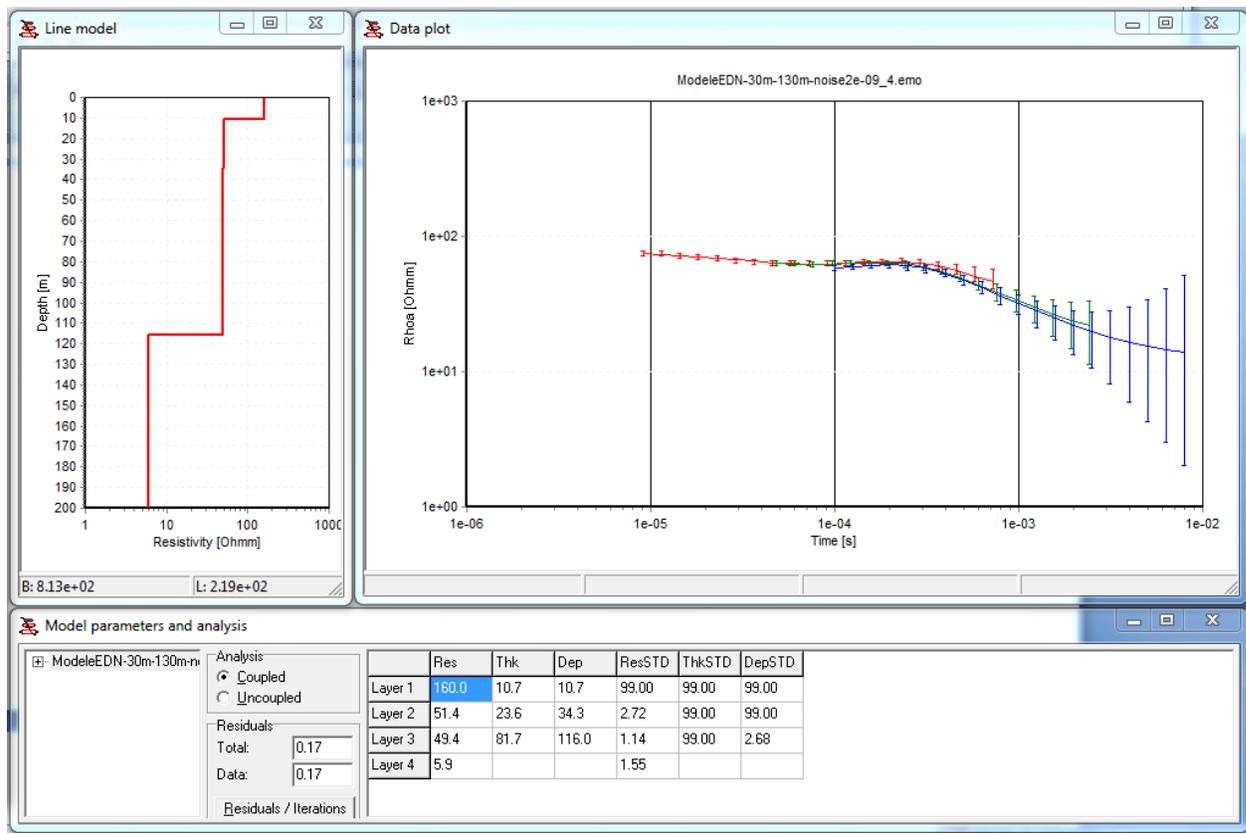


Figure A4-32 : Inversion du modèle EDN h3=30 m p3=130 m sans contraintes avec bruit de 3 nV/m^2

L'analyse des résultats de l'inversion des modèles de données à Etang-du-Nord pour des épaisseurs de la zone de mélange de h3=10m et h3=30 m pour une profondeur de la nappe saline de 130 m nous montre que pour une épaisseur relativement faible par rapport à la profondeur de la nappe saline, cette dernière ne peut être résolue sans et avec ajout de bruit de 3 nV/m^2 comparable aux données réelles. Avec une épaisseur h3=30 m pour une profondeur p3=130 m, l'inversion de ce modèle sans ajout de bruits a permis d'estimer la résistivité ρ_3 de la zone de mélange à $9.8 \Omega.m$ et l'épaisseur à h3=29.2 m pour une profondeur de la nappe saline estimée de 129.9 m (excellente résolution). Nous constatons, en revanche qu'avec un ajout de bruit de 3 nV/m^2 le signal se noie dans le bruit, ce qui ne permet pas de résoudre les paramètres de la zone de mélange.

Modélisation-Inversion Grande-Entrée

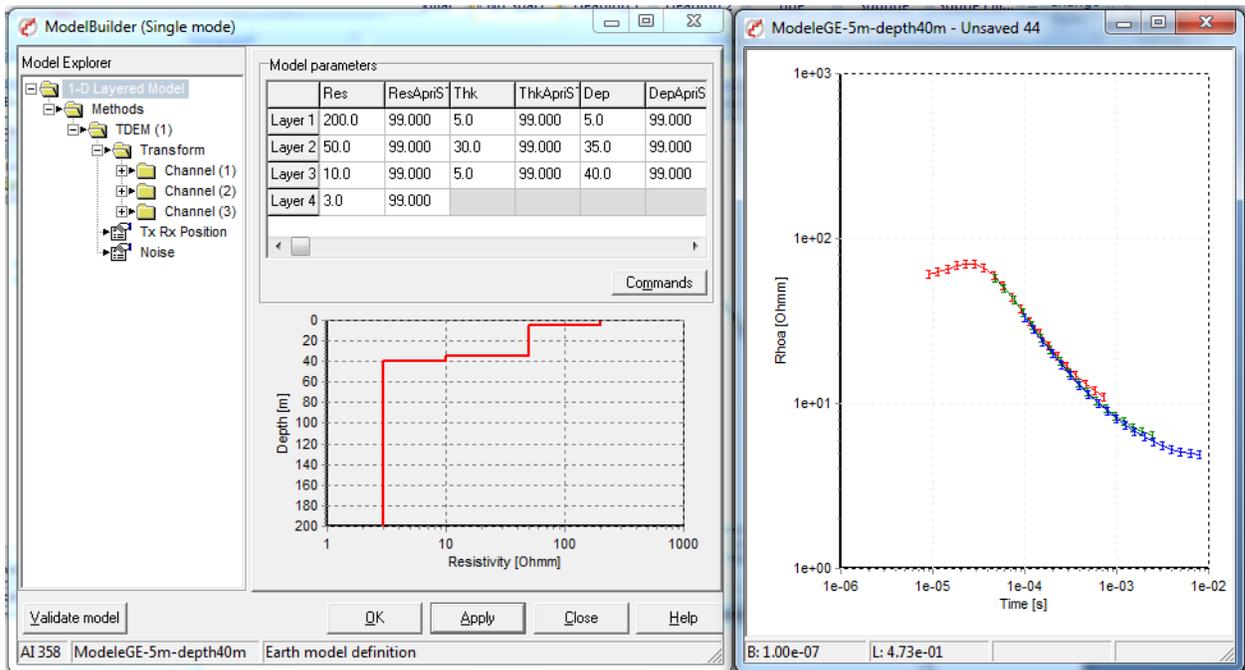


Figure A4-33: Modèle GE h3=5 m p3=40 m avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

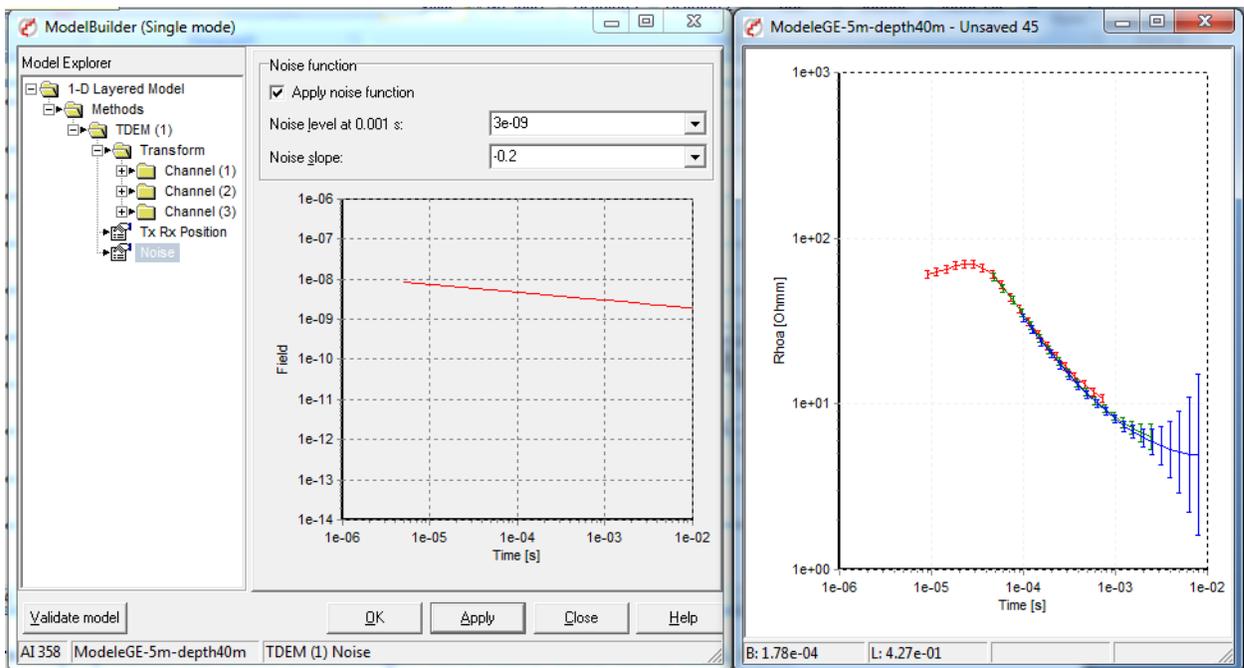


Figure A4-34: Modèle GE h3=5 m p3=40 m avec bruit de $3nV/m^2$

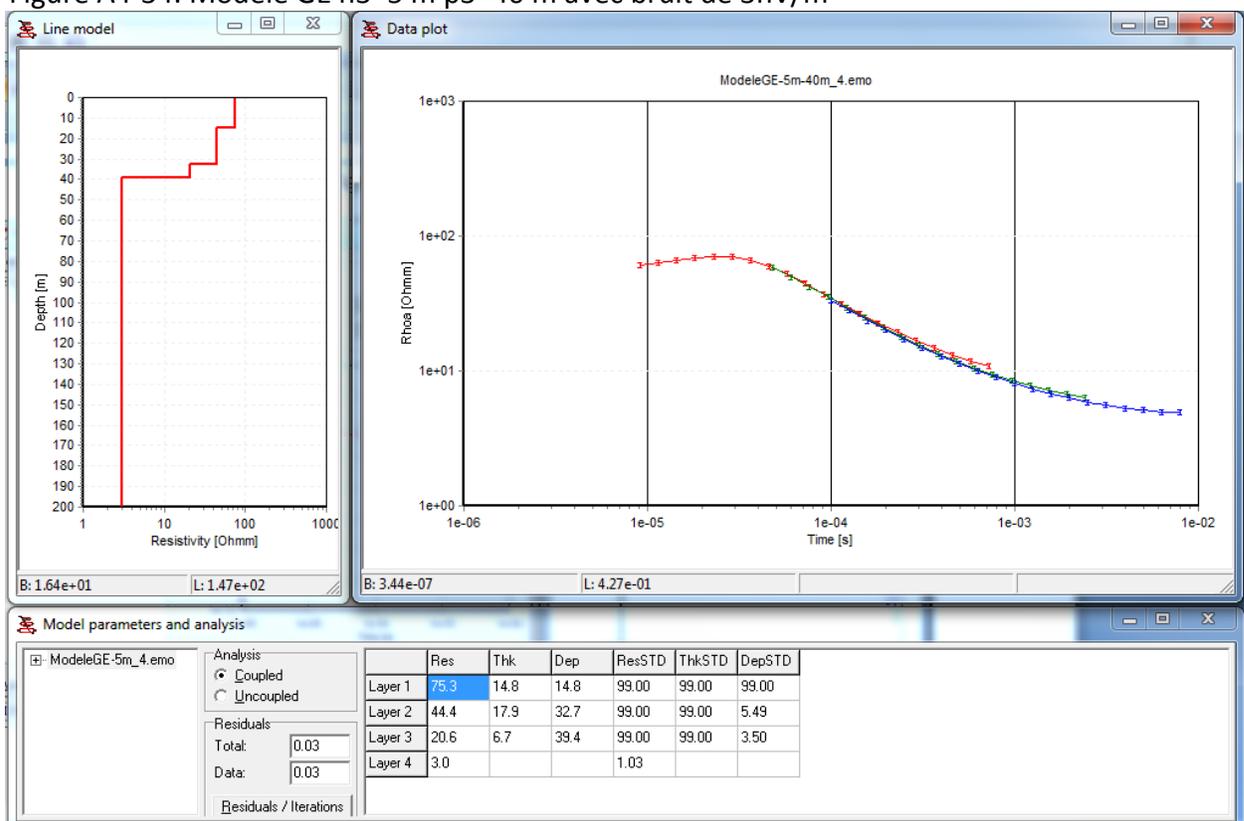


Figure A4-35: Inversion du modèle GE h3=5 m p3=40 m sans contraintes avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

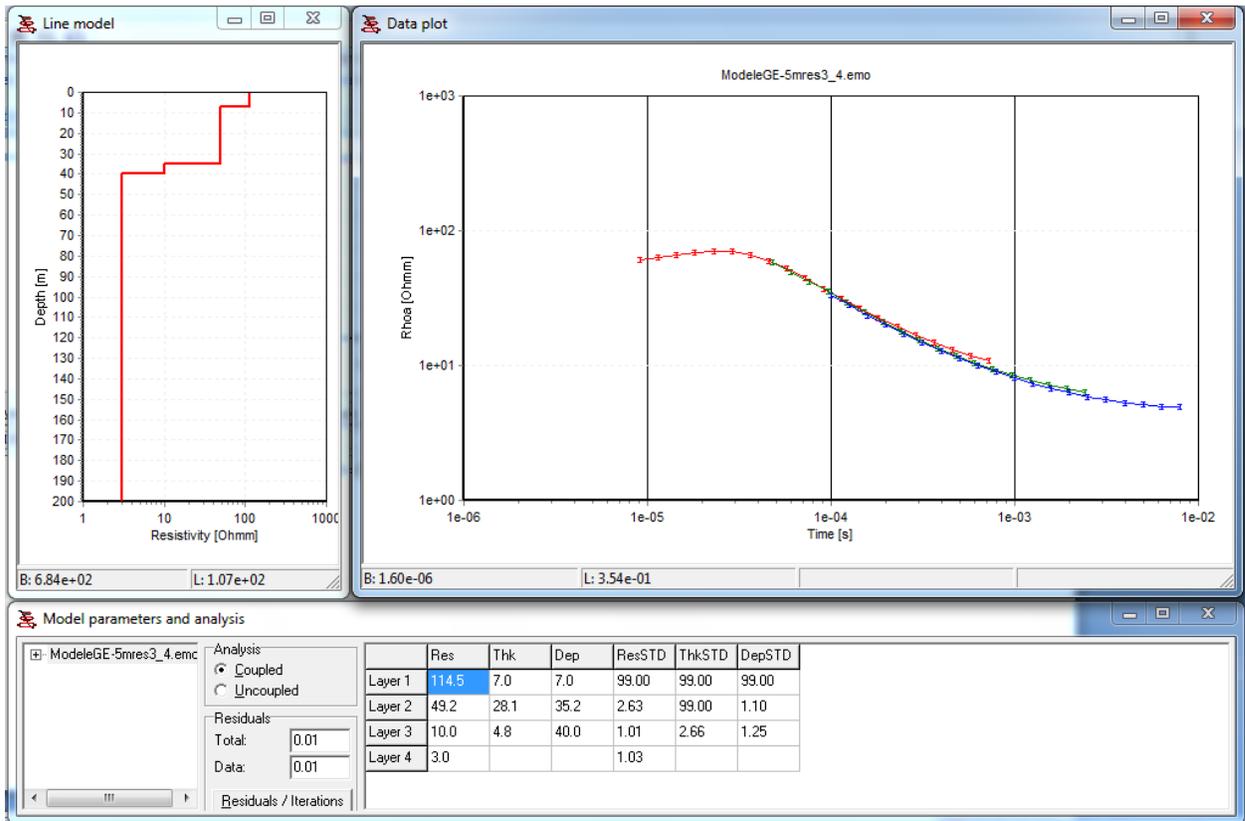


Figure A4-36: Inversion du modèle GE h3=5 m p3=40 m avec contraintes p3=10 Ω.m avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

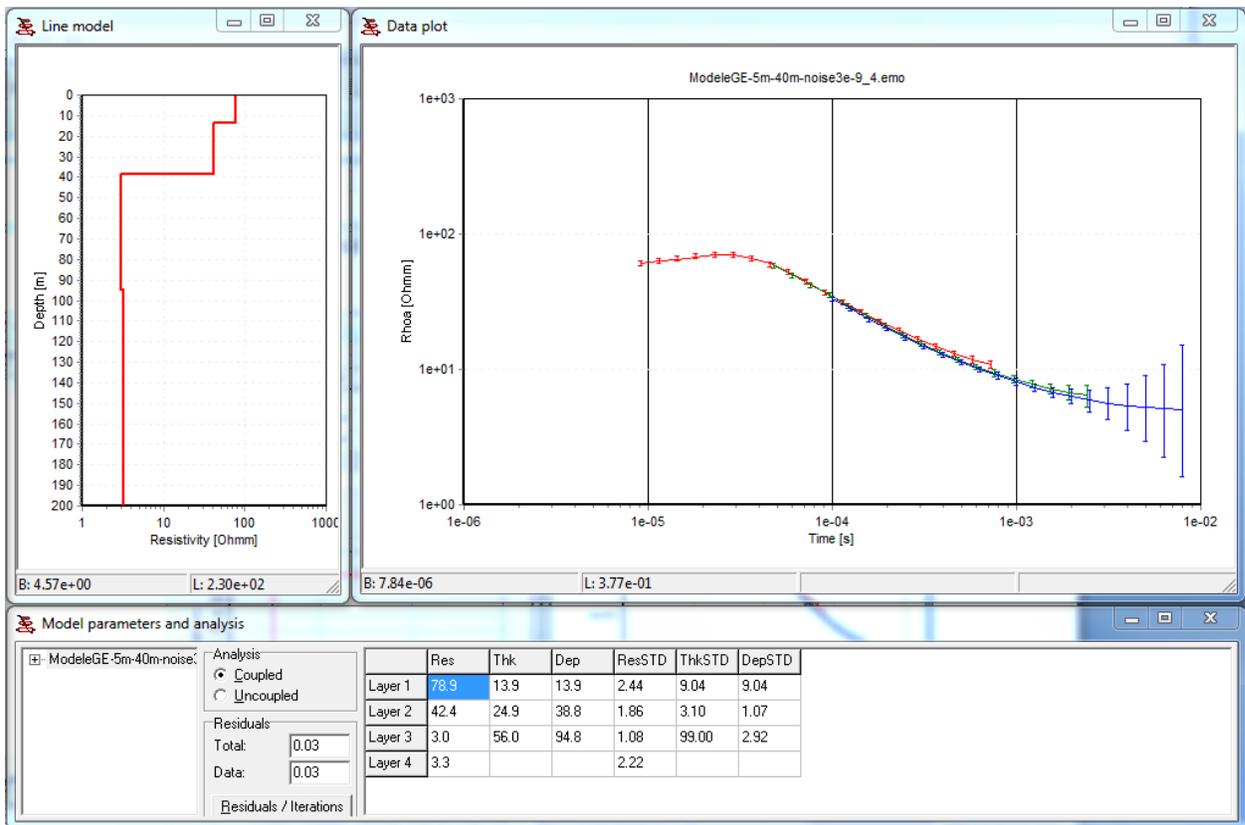


Figure A4-37: Inversion du modèle GE h3=5 m p3=40 m sans contraintes avec bruit de 3nV/m²

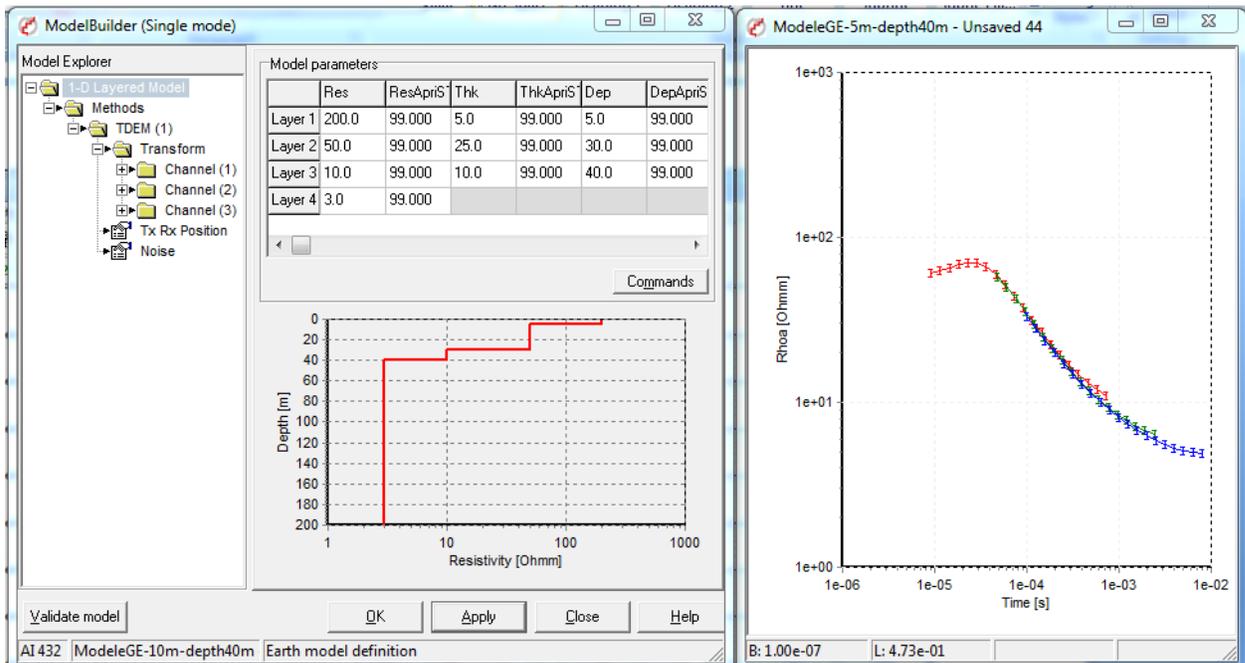


Figure A4-38: Modèle GE h3=10 m p3=40 m avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

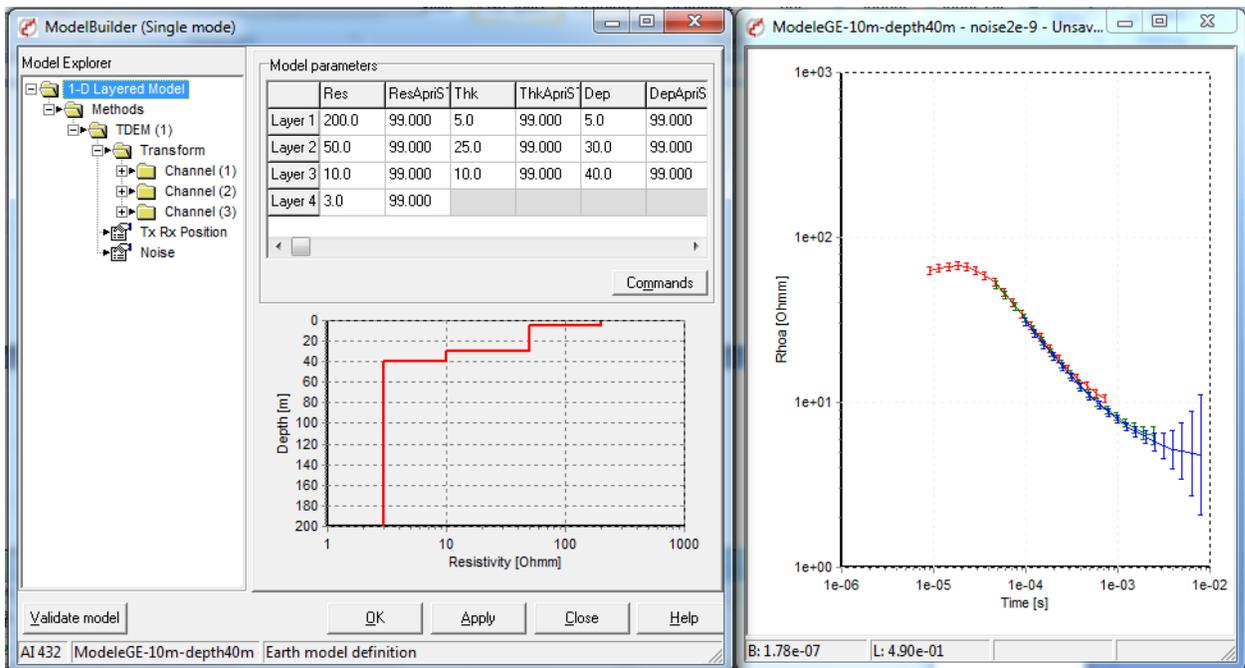


Figure A4-39: Modèle GE h3=10 m p3=40 m avec bruit de $3nV/m^2$

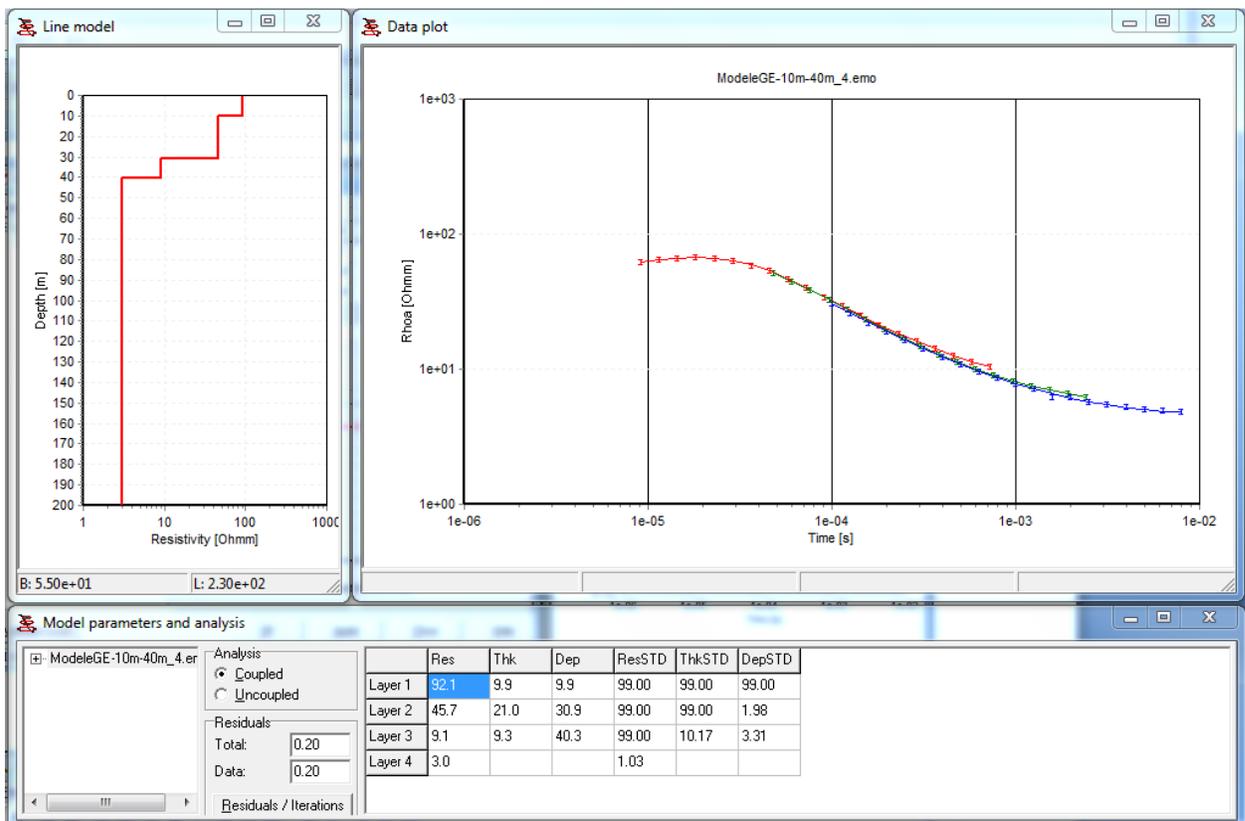


Figure A4-40: Inversion du modèle GE h3=10 m p3=40 m sans contraintes avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

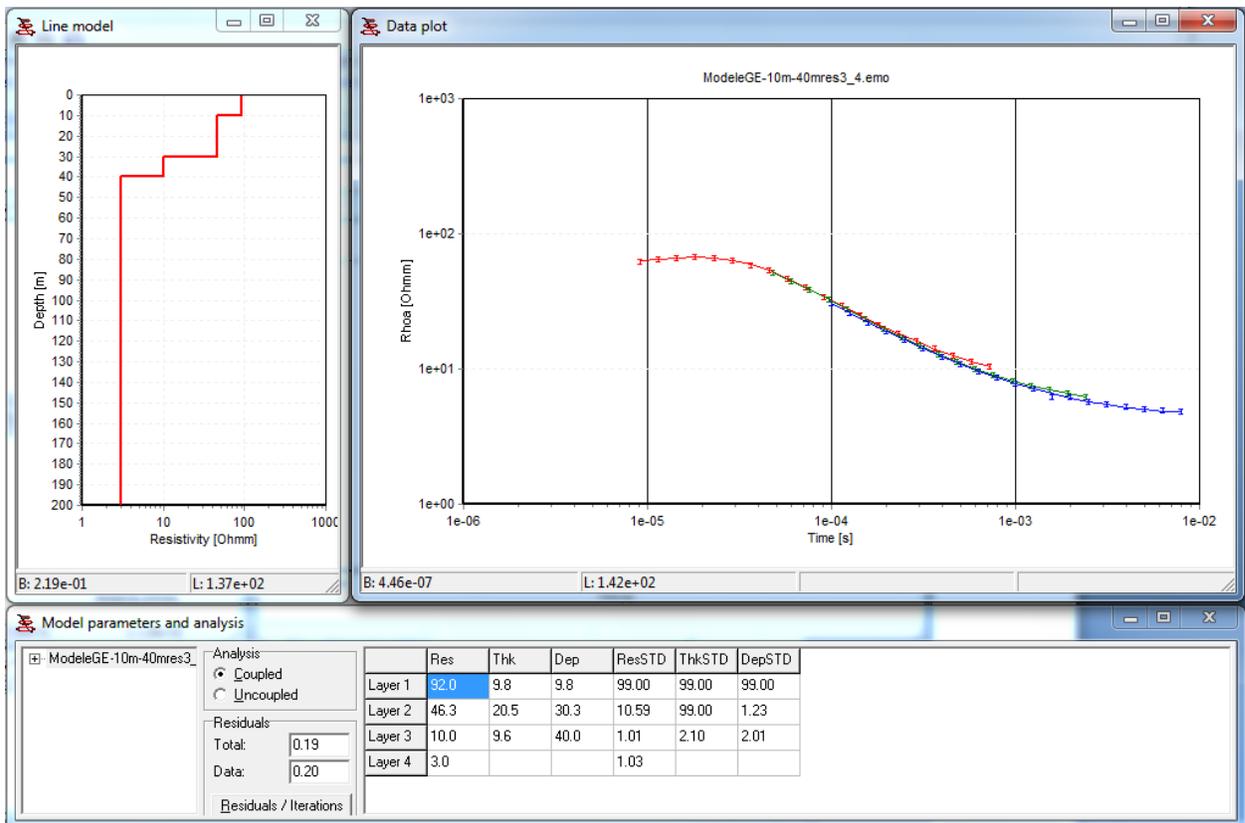


Figure A4-41: Inversion du modèle GE h3=10 m p3=40 m avec contraintes p3=10 Ω.m avec erreur relative constante

Îles-de-la-Madeleine : Phase II (2010-2011)

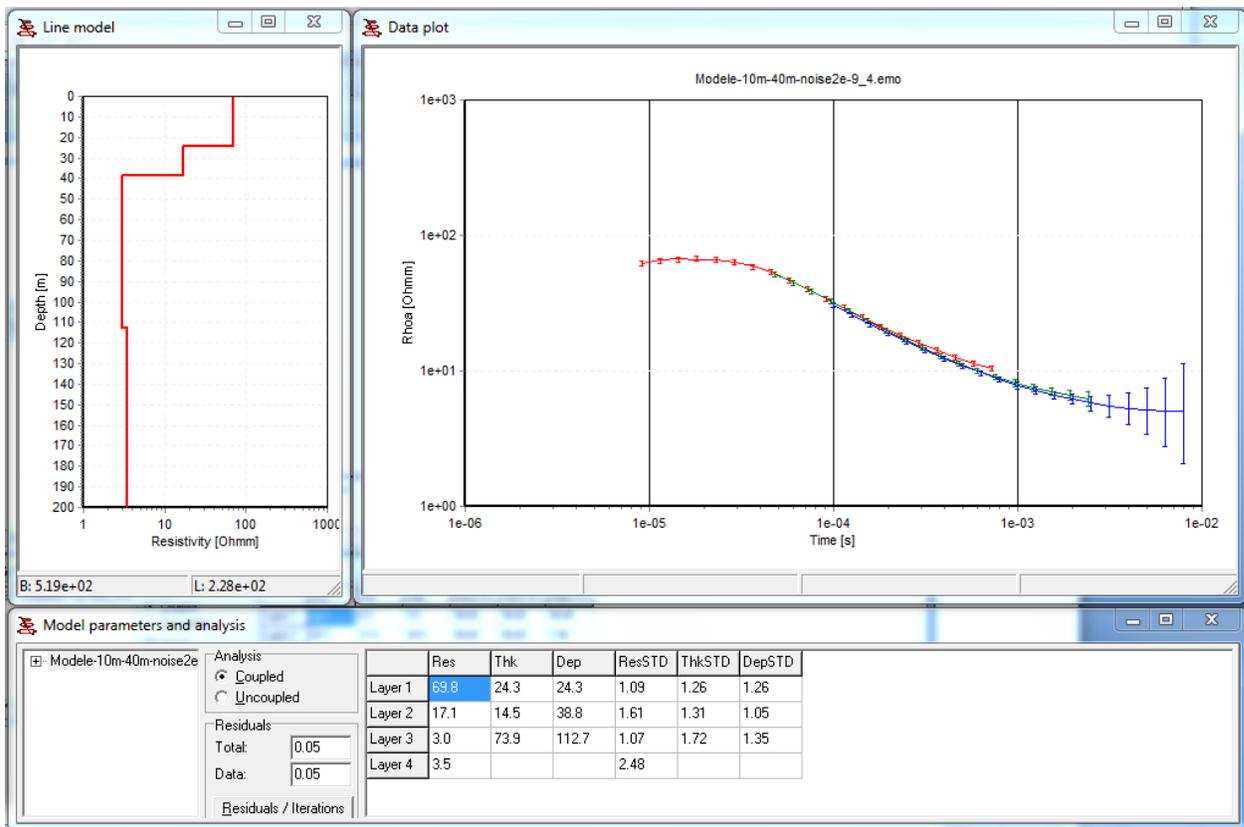


Figure A4-42: Inversion du modèle GE h3=10 m p3=40 m sans contraintes avec bruit de 3nV/m²

L'inversion sans contraintes du modèle à Grande-Entrée d'une épaisseur de h3=5 m de la zone de mélange pour une profondeur de la nappe saline de 40 m n'a pas permis de résoudre celle-ci de façon optimale. Nous avons obtenus une résistivité p3=20.6 Ω.m et une épaisseur h3=6.7 m sans ajout de bruit. En contraignant la résistivité p3 nous arrivons à mieux estimer l'épaisseur de la zone de mélange (h3=4.8 m). En ajoutant un niveau de bruit de 3nV/m², les paramètres estimés de la zone de mélange ont été très mal résolus; par contre, la profondeur de la nappe saline interprétée est de 38.8 m, proche de la valeur de 40 m du modèle initial. À noter que la 4^{ème} couche est ici identique à la 3^{ème} et n'est donc pas nécessaire pour l'inversion. En augmentant l'épaisseur de la zone de mélange h3=10 m dans le modèle sans bruit, nous arrivons à mieux estimer ses paramètres. En effet, nous avons obtenus une résistivité p3=9.1 Ω.m et une épaisseur h3=9.3 m pour une profondeur de la nappe saline estimée à 40.3 m. En contraignant la résistivité p3, nous arrivons à mieux résoudre l'épaisseur de la zone de mélange, h3 a été estimée à 9.6 m et la profondeur de la nappe saline trouvée est de p3=40 m. En revanche, un modèle avec ajout de bruit de 3nV/m² ne permet pas d'estimer les paramètres de la zone de transition. Les valeurs obtenues après inversion s'éloigne beaucoup du modèle direct.

Niveau de bruit Havre-Aux-Maisons

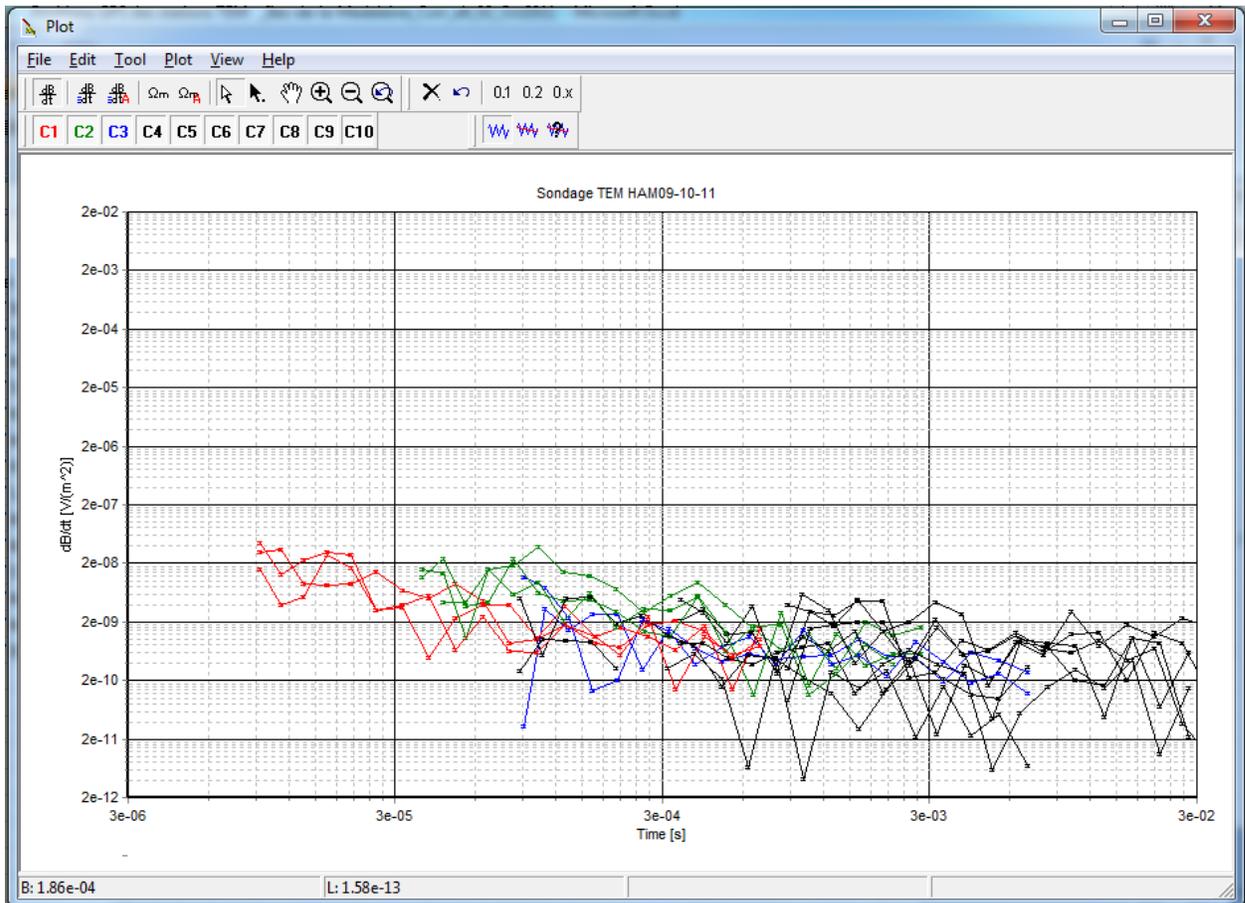


Figure A4-43: Superposition des bruits enregistrés sur les sondages HAM09 HAM10 et HAM11

Le niveau de bruit sur les sondages Havre-Aux-Maisons varie autour de $4.4 \cdot 10^{-9} \text{ V/m}^2$ à $5.810^{-12} \text{ V/m}^2$ à partir du temps 1 ms et la pente est toujours aussi faible comme dans le cas de l'Étang-du-Nord.

Niveau de bruit à Grande-Entrée

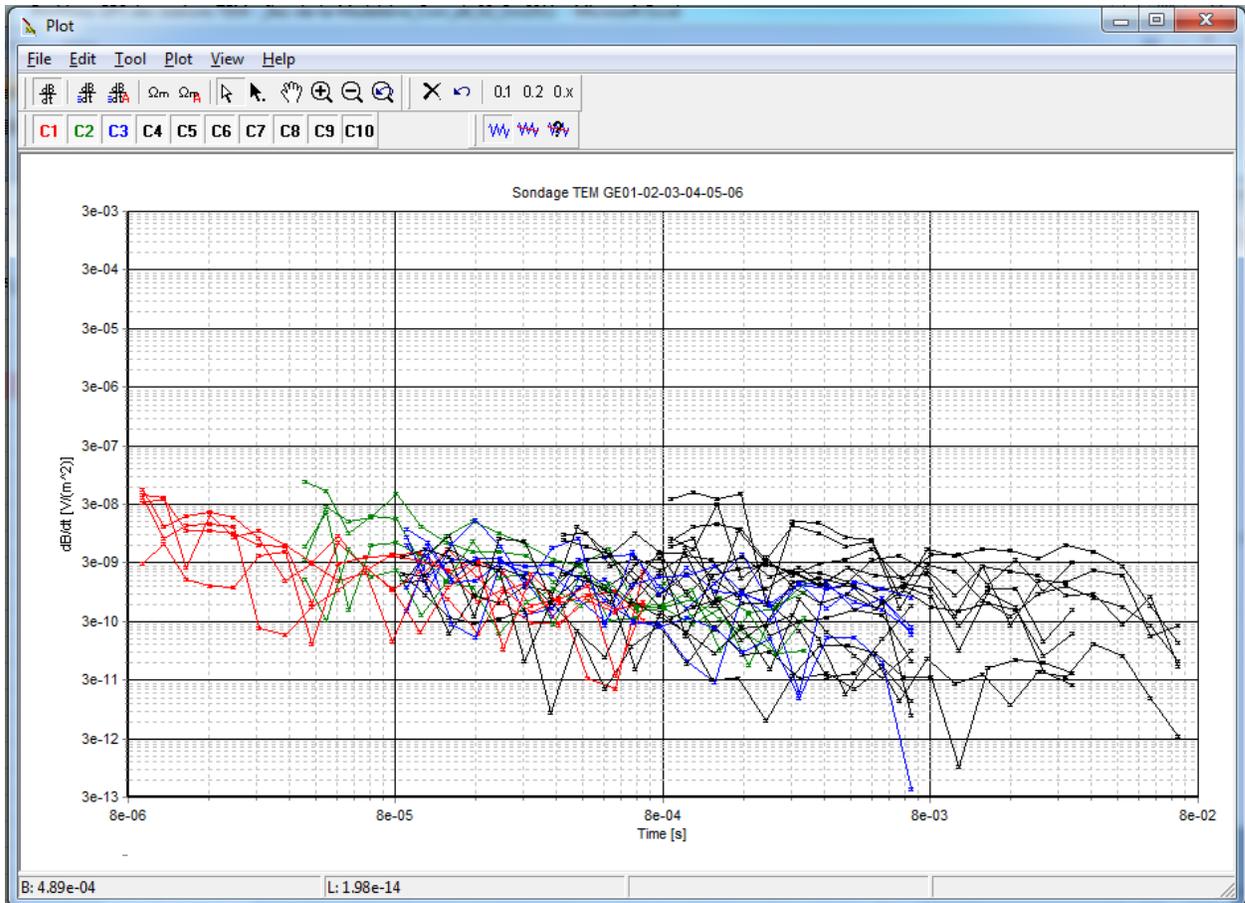


Figure A4-44: Superposition des bruits des sondages GE01, GE01, GE03, GE04, GE05, GE06.

Le niveau de bruit à Grande Entrée varie autour de $1.7 \cdot 10^{-8} \text{ V/m}^2$ et $4.8 \cdot 10^{-13} \text{ V/m}^2$ à partir du temps de 1 ms.