



Résistivité électrique des formations des Basses-Terres du St-Laurent et leur modélisation magnétotellurique

RAPPORT INRSCO2-2010

par

**Guillaume Cyr
Bernard Giroux**

Septembre 2010 – Québec

R-1185

ISBN : 978-2-89146-729-2:

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Données.....	5
2.1.	Limites entre les lithologies.....	6
2.2.	Analyse <i>k-means</i>	8
3.	Modélisation directe	10
4.	Inversion	11
4.1.	Programme rhoplus.....	11
4.2.	Programme IPI2Win MT	12
5.	Conclusion	12
6.	Références	13
7.	Annexes	14

1. Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce rapport est d'évaluer la capacité de la méthode magnétotellurique (MT) à imager les principales unités lithostratigraphiques du bassin des Basses-Terres du St-Laurent, dans la région de Bécancour. Pour ce faire, on étudie d'abord les résistivités de ces unités à partir de diagraphies en forage pour dresser un modèle type qui doit ensuite servir à calculer la réponse MT. Cette réponse est ensuite soumise à un calcul d'inversion afin de déterminer dans quelle mesure les unités peuvent être retrouvées. Les résultats montrent que l'inversion non contrainte ne peut restituer le modèle initial, et que l'inversion avec contraintes doit être envisagée.

2. Données

Plusieurs diagraphies sont disponibles dans les Basses-Terres du St-Laurent, mais seulement un nombre limité affiche la résistivité électrique. De plus, ces diagraphies ont été acquises par plusieurs compagnies utilisant des sondes différentes. Nous retrouvons des diagraphies de résistivité (puits A60,

A125), de *laterolog* (puits A156, A156(a)), de *deep laterolog* (puits A186, A188, A199) ainsi que des diagraphies de *deep induction phasor* qui n'ont pas été utilisées dû à leur grande variabilité et leur faible résolution verticale (Schlumberger, 1987).

Bien que ces sondes permettent de distinguer facilement les différentes lithologies, elles ne montrent entre elles que très peu de constance en ce qui concerne la résistivité des différentes formations. Puisque le *deep laterolog* est moins influencé par la résistivité de la boue du puits, nous croyons qu'il donne la vraie résistance de la formation. Pour cette raison, seules les diagraphies de *deep laterolog* ont été utilisées dans ce rapport.

Les tableaux suivant indiquent les profondeurs des interfaces et les résistivités moyennes des unités au puits A186. Les profondeurs en mètres sont tirées du rapport de Bédard et al. (2010). Les données ont par la suite été converties en pieds puisque les diagraphies utilisent cette unité. Les indices correspondent à la n^e valeur du fichier de données correspondant à ces profondeurs. La stratigraphie des Basses-Terres du St-Laurent est en annexe, avec les tableaux pour les puits A188 et A199.

Tableau 1 – Profondeurs aux interfaces au puits A186

Formations	Profondeur de la base (m)	Profondeur de la base (pieds)	Indice
Lorraine	799	2621.5	7827
Utica	830	2723.25	8234
Tétreauville	877	2877.5	8851
Deschambault	970	3182.5	10071
Black River	979	3212	10189
Beauharnois	1075	3527	11449
Theresa	1192	3911	12985
Cairnside	1345	4413	14993
Covey Hill	1380.74	4530.25	end

Tableau 2 – Résistivités au puits A186

Formations	Moyenne de la résistivité (ohm m)	Écart type de la résistivité (ohm m)	Comportement
Lorraine sup.	10.5	3.2	
Lorraine inf.	16.4	3.2	remontée
Utica	144	86	
Tétreauville	42.5	14.5	Légère hausse de 30 à 50 ohm m
Deschambault	2400	3100	Très variable
Black River	249.7	130.4	
Beauharnois	454.3	431	Creux : 300 ohm m Pics : 1000 ohm m
Theresa	573.4	435.3	Pics moins nombreux
Cairnside	110	87.1	Le supérieur est indistinguable du Theresa (zone de transition)
Covey Hill	2000	3500	Lit très peu résistif (20 ohm m) de 30 mètres

Le Lorraine a été divisé en deux parties puisque leur résistivité montre un comportement facilement discernable.

En dehors de la valeur de résistivité du Covey Hill du puits A199 qui est beaucoup plus faible que dans les puits A186 et A188, on peut voir que la plupart des formations peuvent être distinguées en se basant sur leur résistivité.

Puisque les divisions entre les lithologies ont été faites en se basant principalement sur les diagraphies de rayon gamma, de porosité-neutron et de porosité densité, une légère différence dans les limites peut

être vue entre les données de l'Annexe 1 du rapport et les graphiques ci-dessous. Prenant cela en compte, seules les valeurs montrant un comportement régulier ont été prises dans le calcul de la moyenne et de l'écart type de la résistivité.

2.1. Limites entre les lithologies

À titre illustratif, les données du puits A186 sont mises en graphique. Les unités inférieures à l'Utica sont présentées en annexe.

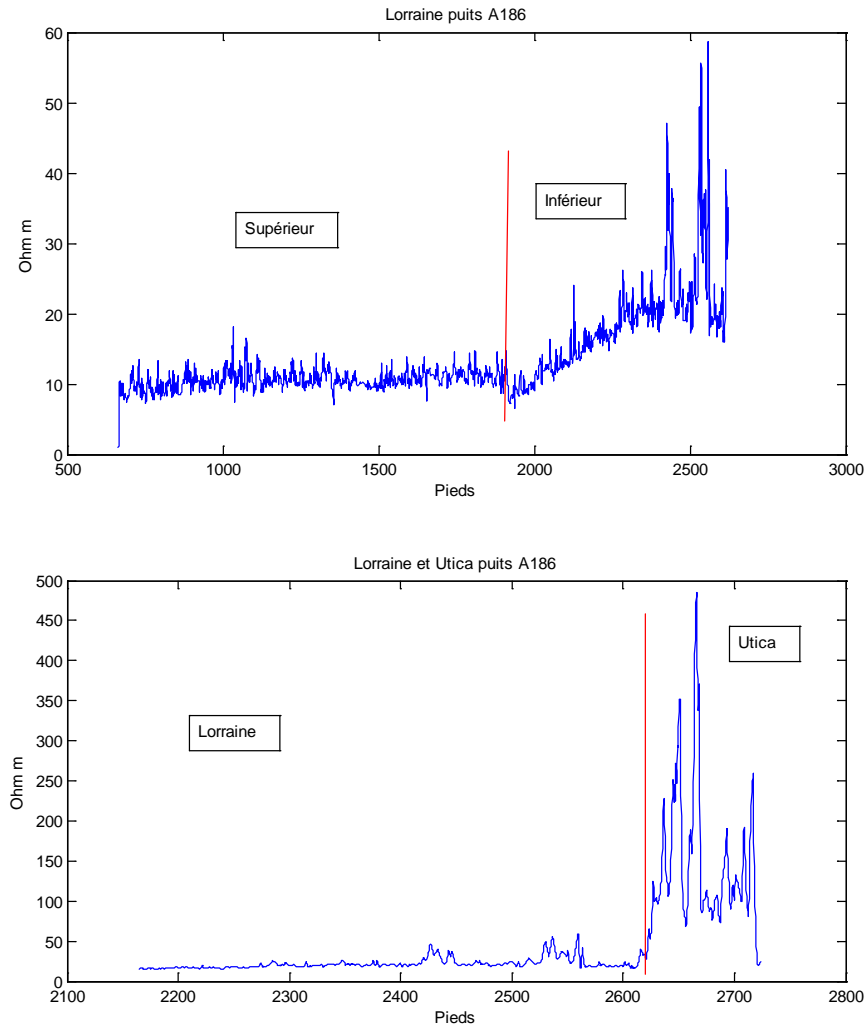


Figure 1 – Résistivité *deep laterolog* au puits A186.

La description des lithologies est tirée de Globensky (1987). L'analyse des figures ci-dessus montre que le Lorraine pourrait être séparé en deux couches en se basant sur ses propriétés électriques. Nous prenons donc comme hypothèse qu'un logiciel d'inversion magnétotellurique (MT) peut résoudre cette différence.

La limite entre les turbidites du Lorraine (shales argileux et siliceux) et les shales calcaireux d'Utica est très nette. La limite entre l'Utica et les calcaires du Trenton est également très nette.

La formation de Tétréauville (calcaire argileux) et la formation de Deschambault (calcaire presque pure) sont facilement distinguables, la résistivité variant de plusieurs ordres de grandeur.

La limite entre le Trenton et la dolomie calcaireuse du Black River est floue. De plus, dû à son épaisseur

limitée (9 m), nous prenons comme hypothèse qu'il ne pourra pas être résolu lors d'un relevé MT.

Puisque dans plusieurs puits le Chazy (calcaires dolomitiques et argileux) est soit mince, soit absent et qu'il peut facilement être confondu avec les grès dolomitiques du Beekmantown, le groupe a été ignoré dans l'analyse.

Les deux formations du Beekmantown, Beauharnois (dolomie) et Theresa (grès dolomitique), montrent un comportement indistinguable en se basant sur leur résistivité. On peut toutefois noter que pour certains puits, la hauteur et la densité des pics sont plus faibles pour le Theresa. Par contre, nous prenons comme hypothèse qu'un relevé MT ne peut les résoudre sur ce principe.

Bien que la limite entre le Theresa et les grès quartzique du Cairnside soit graduelle, les deux

lithologies sont facilement distinguables.

La limite entre les formations du Potsdam, Cairnside et Covey Hill, est très floue. Le grès conglomératique du Covey Hill est toutefois intercalé par des dolomies microcristallines très résistives. Nous prenons comme hypothèse qu'un relevé MT ne pourra pas résoudre ces formations, mais qu'il pourrait résoudre ces lits de dolomie.

Puisque les diagraphies atteignent rarement le socle précambrien et que la résistivité du Covey Hill est semblable à ce que nous pourrions nous attendre d'une roche métamorphique, le groupe a été considéré d'extension semi infinie.

2.2. Analyse *k-means*

Une analyse statistique par la méthode *k-means* a

ensuite été faite (Seber, 2984). La méthode consiste à regrouper un nuage de données en *k* groupes en minimisant la moyenne des distances des points avec le point central du groupe. Dans la présente étude nous avons pris la résistivité pour la variable en abscisse et la diagraphie de rayon gamma pour la variable en ordonnée. De plus, la valeur de *k* a été fixée à 2. Un taux de correspondance entre les groupes calculés et les vraies lithologies a aussi été calculé. Un taux de correspondance de 1 signifie une parfaite corrélation entre les variables et un taux de 0.5 un comportement totalement aléatoire. Au delà des gradeurs du taux de correspondance, les figures suivantes permettent d'apprécier si les formations sont recoupées ou non du point de vue électrique.

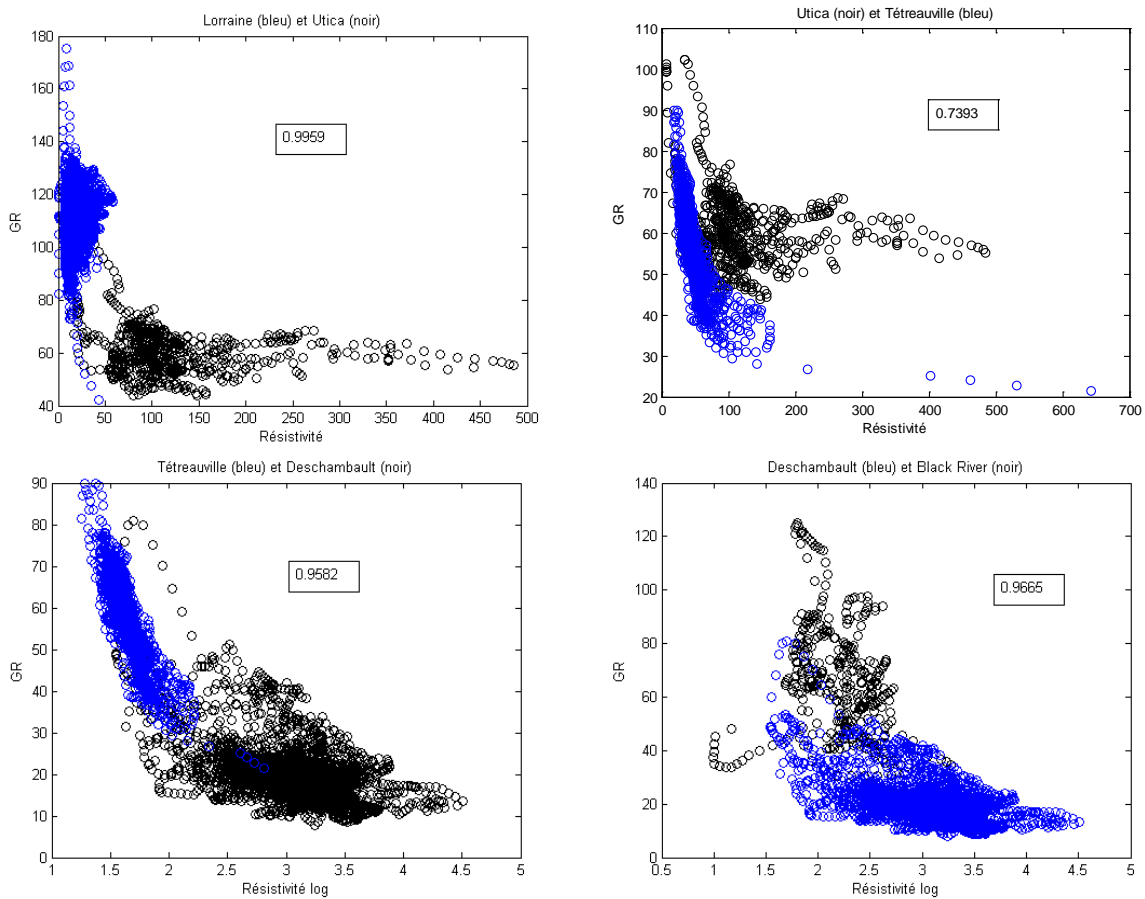


Figure 2 – Analyse *k-means* des diagraphies électriques

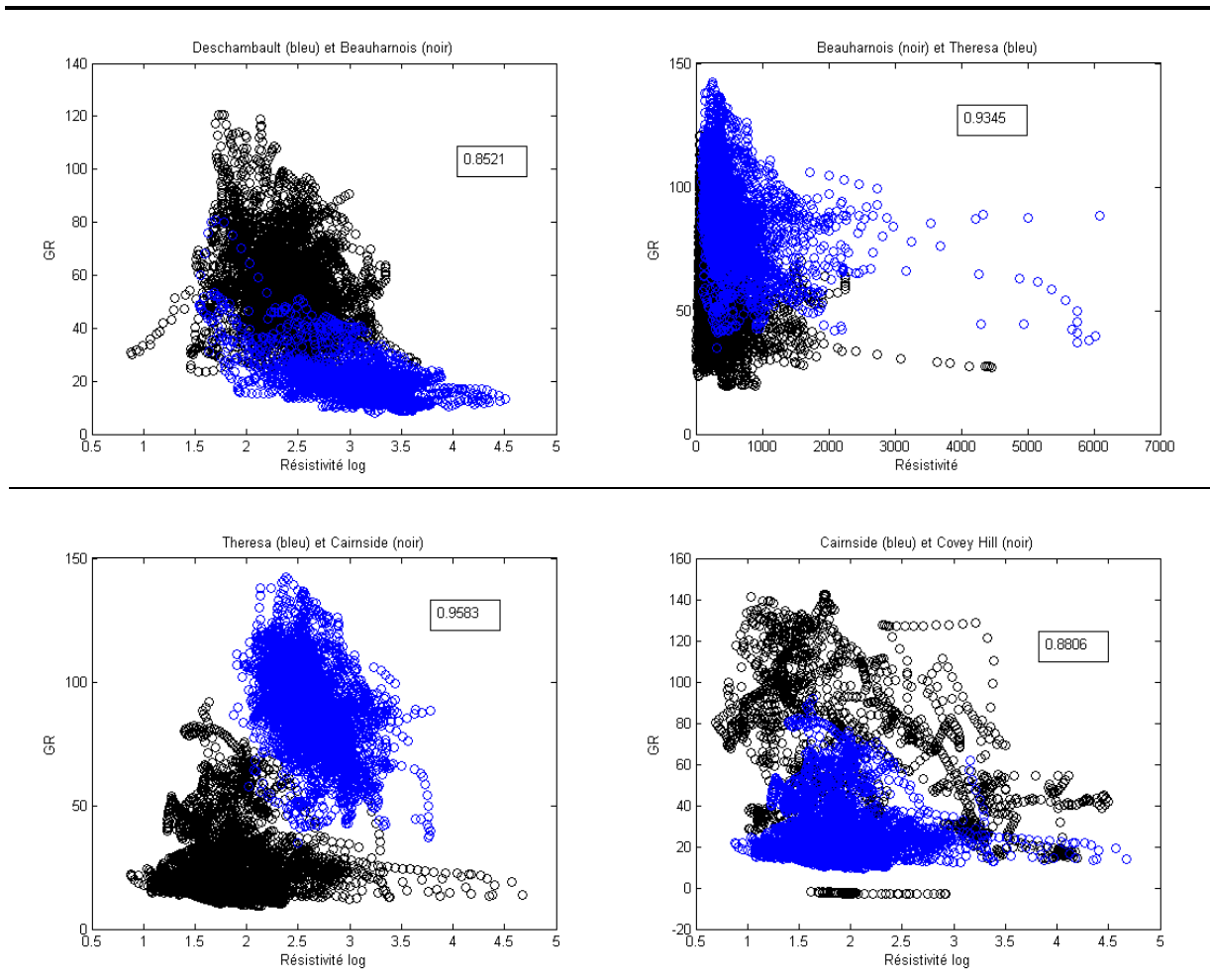


Figure 3 - Analyse k-means des diagraphies électriques (suite)

En se basant sur le taux de correspondance calculé, nous pouvons voir que le Lorraine et l'Utica correspondent à deux groupes très bien distincts (0.9959) tandis que pour l'Utica et le Tétreauville, la correspondance est plutôt faible (0.7393). Cela peut être expliqué par le fait que l'Utica est composé de shale calcaireux et le Tétreauville de calcaires argileux. Donc, seule la proportion de calcaire et de shale change entre les deux lithologies. Ce changement en proportion est suffisant pour bien les distinguer avec les valeurs moyennes des diagraphies de rayon gamma et de résistivité, mais point par point les deux lithologies sont presque identiques puisque composées des mêmes minéraux.

Les taux de correspondance Tétreauville/Deschambault (0.9582), Deschambault/Black River (0.9665) et Theresa/Cairnside (0.9583) sont très bons. Donc, les lithologies sont facilement distinguables. Le taux de correspondance Cairnside/Covey Hill est un peu plus faible (0.8806), donc les lithologies sont plutôt semblables. Ce qui est en fait les mêmes

conclusions que précédemment.

Bien qu'antérieurement nous arrivions à la conclusion que le Beauharnois et le Theresa étaient indistinguables sur la base de leur résistivité, le haut taux de correspondance (0.9345) montre qu'ils font partie de deux groupes distincts. Ce qui peut être expliqué par le fait que la diagraphie de rayon gamma est très différente entre les deux.

Puisque le Black River est un groupe très mince, nous avons également calculé la correspondance entre le Deschambault et le Beauharnois. La valeur obtenue n'est que de 0.8521. Les deux lithologies sont facilement distinguables sur la base de leur résistivité ou de leur diagraphie de rayon gamma seule. Toutefois, lorsque les deux propriétés sont mises en commun, la correspondance diminue. Cela est explicable par la grande variabilité des deux courbes dans ces formations.

3. Modélisation directe

La modélisation a été faite avec le programme `mt1dfwd` dont le code source est disponible à <http://liamg.ete.inrs.ca/?q=content/bernard-giroux>.

Ce programme solutionne l'équation récursive de Wait (Simpson et Bahr, 2005).

La résistivité moyenne (ohm m) et la localisation (m) du sommet des lithologies du puits A186 sont disponibles dans le fichier `A186.txt` (fourni en annexe).

Puisque le programme prend les données sous forme de conductivité (S/m), les données ont été inversées. Elles sont disponibles dans le fichier `A186c.txt`. Bien que l'inverse d'une moyenne ne soit pas identique à la moyenne des inverses, nous avons considéré que cette différence n'était pas assez importante dans le but de l'analyse.

La première ligne du fichier d'entrée de `mt1dfwd` doit commencer par un % et est considérée comme un commentaire. Le sommet et la conductivité suivent en deux colonnes.

Significations des commandes de `mt1dfwd` :

`l` : période minimum (s)

`n` : nombre de valeur par décade du fichier de sortie

`t` : nombre total de valeur du fichier de sortie

`o` : nom du fichier de sortie

`m` : nom du fichier d'entrée

La commande

```
mt1dfwd -l 0.001 -n 4 -t 30 -m  
A186c.txt -o A186mt1dfwd.dat
```

a été utilisée pour obtenir le fichier `A186mt1dfwd.dat`. La première colonne est la période (s), la seconde la résistivité apparente (ohm m) et la troisième la phase (deg).

Puisque le programme `mt1dfwd` est écrit en UNIX, le fichier ne peut pas être visualisé sous Windows, mais Matlab reconnaît le fichier sans problème et les données peuvent y être importées.

Les valeurs de la période ont été inversées en fréquence (Hz), une colonne d'incertitude sur la résistivité a été ajoutée en 3e place. L'incertitude a été supposée à 10%. Puisque les codes d'inversions MT

utilisent le logarithme de la résistivité, l'incertitude ne doit pas être nulle. Une colonne d'incertitude de la phase a également été ajoutée en 5e place et supposée à 5%.

Une 6e et une 7e colonne remplies de 1 ont ensuite été ajoutées et représentent le poids statistique accordé aux valeurs. De plus, seules les données allant de 1000 à 0.1 Hz ont été conservées puisque les plus basses fréquences sondent trop profondément. Les données sont disponibles sur le fichier `A186data.txt` et le résultat affiché ci-dessous.

Comme on peut s'y attendre, la résistivité apparente plafonne à celle du Lorraine aux hautes fréquences (sondage peu profond) et tend vers celle du Covey Hill aux basses fréquences (sondage profond).

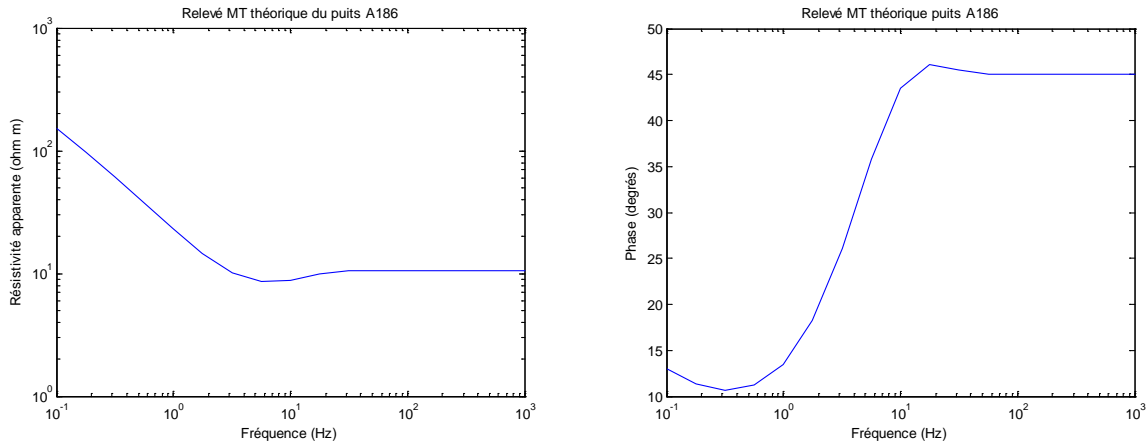


Figure 4 – Courbe MT théorique

4. Inversion

Les inversions réalisées dans ce travail l'ont été sans appliquer de contrainte sur les paramètres. Deux programmes basés sur des philosophies différentes ont été utilisés.

4.1. Programme rhoplus

Ce programme est l'implémentation de la théorie de Parker et Booker (1995). Il est disponible à l'hyperlien <http://mtnet.dias.ie/programs/rhoplus.zip>. Pour utiliser le logiciel, il faut ajouter les commandes suivantes dans le fichier d'entrée :

```
echo on
data *
model
root A186rhoplus
surface insul
execute
```

Pour 1) signifier que l'on commence l'écriture dans le fichier de sortie, 2) que les données suivent la commande execute, 3) que l'on recherche un modèle à couches, 4) que le nom du fichier de sortie soit A186rhoplus.out, 5) que la surface soit isolante et 6) lancer le programme. De plus, un 0 doit être ajouté à la suite des données pour dicter la fin du programme (voir fichier A186rhoplus2.dat).

Dans le logiciel rhoplus, entrez la commande
read A186rhoplus2.dat

Les résultats sont affichés dans le fichier A186rhoplus.out. À la fin, on y trouve le modèle en couches qui a été retranscrit dans le fichier model.txt.

Les données sont en conductance (S) et doivent être retraitées pour les avoir en conductivité (S/m) ou en résistivité (ohm m). Il faut donc diviser les conductances par la séparation pour obtenir la conductivité et inverser le résultat pour avoir la résistivité. Il faut également prendre note que les données sont en km. Le résultat est affiché dans le fichier couches.txt.

La comparaison entre les données initiales et le modèle d'inversion est affichée ci-dessous.

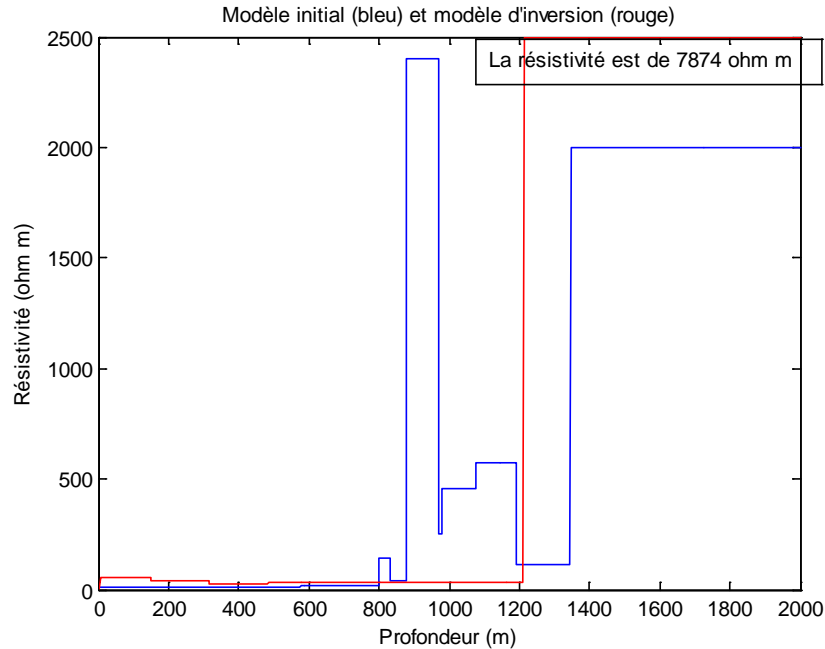
Quatre problèmes sont apparents :

La résistivité du Lorraine est trop élevée. Les valeurs vont de 58 à 24 ohm m, alors que la vraie valeur est de 10.5 ohm m.

L'inversion ne résout pas les couches entre l'Utica et le Potsdam.

L'inversion trouve une limite entre les couches de hautes et basses résistivités, mais elle est près de 200 m moins profonde que prévue.

La dernière couche est à 7874 ohm m alors qu'elle devrait plafonner à 1800 ohm m.



4.2. Programme IPI2Win MT

Le logiciel IPI2Win MT (disponible au site http://geophys.geol.msu.ru/ipi_mts/ipi_mts.htm) solutionne le problème inverse avec une variante de l'algorithme de Newton minimisant le nombre de couches, ou par l'approche de régularisation de Tikhonov. Le programme prend les données d'entrée en tant que racine carrée de la période pour la première colonne. Pour les colonnes suivantes, c'est comme avec le programme mt1dfwd avec la résistivité apparente, son incertitude, la phase et son incertitude dans les colonnes 2, 3, 4 et 5 respectivement. Il faut de plus ajouter les commandes suivantes au début du fichier de données :

- 1er ligne : commentaire
- 2e ligne : commentaire
- 3e ligne : 1 1
- 4e ligne : nombre de points (1 dans notre cas)
- 5e ligne : Nom du point
- 6e ligne : 0 0
- 7e ligne : Nombre de périodes (17 dans notre cas)

Enregistrer ensuite le résultat avec l'extension .mt. Le résultat a été enregistré sous le nom A186rus.mt.

Le résultat obtenu est très semblable à celui obtenu avec rhoplus et les 4 caractéristiques précédentes peuvent y être observées. Une des couches est même de 98 000 ohm m. Ce logiciel offre par contre une

plus grande versatilité que rhoplus puisqu'on peut y choisir le nombre de couches et y insérer des valeurs d'épaisseur et de résistivité initiales permettant à l'itération de "partir sur le bon pied".

5. Conclusion

La tentative de modéliser un sondage MT théorique et d'en effectuer l'inversion par la suite ne donne pas des résultats près de la réalité. Pour voir où se situerait le problème, d'autres tests ont été exécutés dont un modèle simple à 2 couches et un modèle avec une couche très résistive de 100 000 ohm m, mais même dans ces cas, les mêmes 4 propriétés notées précédemment peuvent être observées. Dans le cas, d'une couche très peu résistive en profondeur, l'inversion MT ne peut résoudre les couches plus résistives (ce qui est normal), mais on observe également un problème de plafonnement. Alors que la couche a été supposée à 0.1 ohm m, le logiciel donne une couche de 0.03 ohm m. Il apparaît donc impératif d'utiliser un algorithme d'inversion permettant d'imposer des contraintes sur la profondeur des interfaces ou la résistivité des couches pour obtenir un résultat plus près de la réalité.

6. Références

Bédard, K., Duchaine, Y., Malo, M., Nouvelle analyse des données de puits gaziers et pétroliers dans la région de Sorel-Bécancour, Rapport INRSCO2-2010-V1.1, 2010.

Globensky, Y., 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MM 85-02, 63 pages

Parker, R. L. & Booker, J. R. Optimal one-dimensional inversion and bounding of

magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1996, 98, 269-282 doi: 10.1016/S0031-9201(96)03191-3

Schlumberger, Log Interpretation Principles/Application, 1987.

Seber, G. A. F. *Multivariate Observations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1984.

Simpson, F. & Bahr, K. *Practical Magnetotellurics* Cambridge University Press, 2005.

7. Annexes

Stratigraphie simplifiée des Basses-Terres du Saint-Laurent

Groupes	Formation	Description
Queenston	Bécancour	Shales gris, rouges et verdâtres avec interits de grès verts. Non fossilifère.
Lorraine	Pontgravé	Shale gris silteux, avec interits de calcaire coquinoïdal, de grès calcaireux et de shale gréseux. Très fossilifère.
	Nicolet	Shale gris, silteux avec interits de grès à grins fins, de siltstone et de calcaire gréseux. Abondance de fossiles.
Shale d'Utica		Shale noir à brun foncé, calcaireux. Présence de graptolites.
Trenton	Tétreauville	Calcaire argileux micritique gris foncé (2 à 15 cm) avec abondants interits de shale calcaireux gris foncé (2,5 à 5 cm). Non dolomitique. 200 espèces de fossiles.
	Montréal	Calcaire argileux gris foncé bioturbé en lits (5-15 cm) irréguliers avec peu d'interits de shales et de calcaires oolithiques gréseux ou dolomitiques. Lithologies variées. Fossilifère.
	Deschambault	Calcarénite presque pure, gris clair à moyen, en lits uniformes (20cm à 1m). Presqu'entièrement composé de fragments de fossiles (surtout crinoïdes). Présence de chert et de pyrite.
	Mile End	Calcolutite à calcaire légèrement cristallin bien stratifié en lits minces. Fossilifère.
Black River	Leray, Lowville, Bonville, La Gabelle	Dolomie gris bleu à gris verdâtre, calcaire à grins fin pâle, oolithique, micritique, pelliculosa; calcaire gris foncé, massif, micritique. Peu à très fossilifère. Lits de 15cm à 1m.
Chazy	Laval	Grès blanc et gris, à grain moyen à grossier.
Beekmantown	Beauharnois	Calcarénites, calcilutites, dolomie et shales. Nombreux changements latéraux et verticaux. Fossilifère.
	Theresa	Grès de base, bioturbé, gris verdâtre et micacé, à matrice calcaireuse, interstratifié avec des shale gris verdâtres. Fossilifère.
Potsdam	Cairnside	Dolomie massive et laminaire, grise, cristalline à dense. Interits de grès dolomitiques. Lits de shale dolomitique plus abondants vers le sommet. Mince couches de calcaire fossilifère dans la partie basale. Fossilifère.
	Covey Hill	Interstratifications de grès quartzitique, grès dolomitiques et de dolomie. La proportion de grès augmente vers le bas de la formation. Fossilifère.
Socle	Cairnside	Grès quartzitique presque pur bien trié, généralement bien cimenté, à grain moyen arrondi, beige à blanc. Très peu fossilifère.
	Covey Hill	Grès et conglomérat feldspathiques rougeâtre et verdâtre, à grain grossier, mal trié et mal cimenté. Intercalations de dolomie microcristalline rouge silteuse.
Socle		Socle précambrien

Discordance majeure →

Profondeurs des interfaces entre les unités stratigraphiques

Tableau 3 - Profondeurs aux interfaces au puits A188

Formations	Profondeur de la base (m)	Profondeur de la base (pieds)	Indice
Lorraine	867.16	2845.25	8702
Deschambault	965	3166.25	9986
Black River	973.84	3195.25	10102
Beauharnois	1091	3579.5	11639
Theresa	1184.45	3886.25	12866
Cairnside	1336	4383.5	14855
Covey Hill	1391.72	456.25	end

Tableau 4 - Profondeurs aux interfaces au puits A199

Formations	Profondeur de la base (m)	Indice
Lorraine	705	5621
Utica	728	5851
Tétreauville	799	6561
Deschambault	863	7201
Black River	877	7341
Beauharnois	1032	8891
Theresa	1148	10051
Cairnside	1316	11731
Covey Hill	1348	12051

Moyenne et écart type

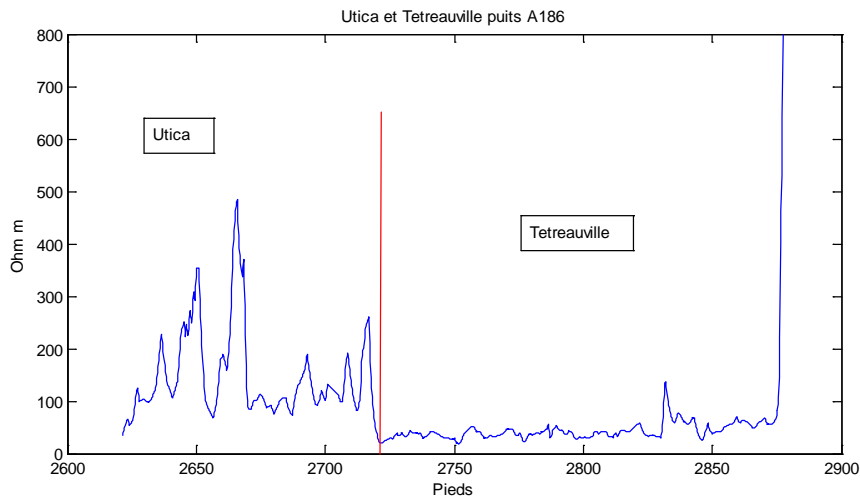
Tableau 5 - Résistivités au puits A188

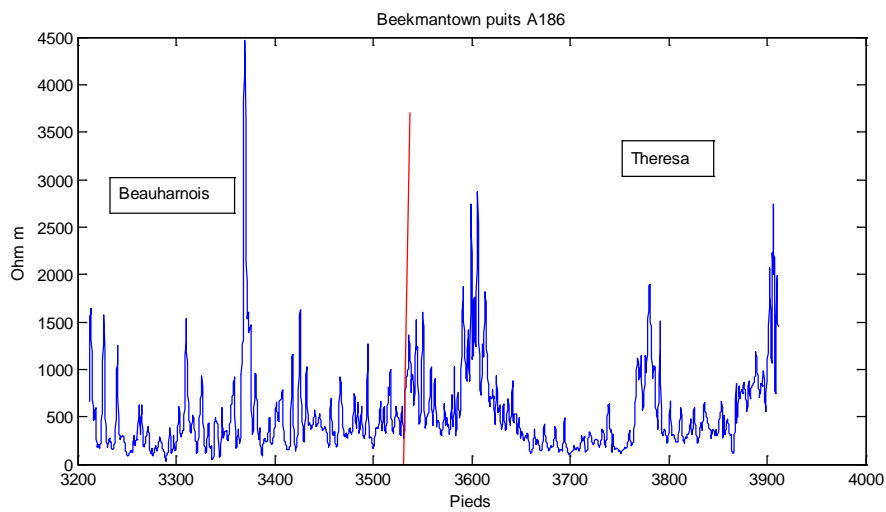
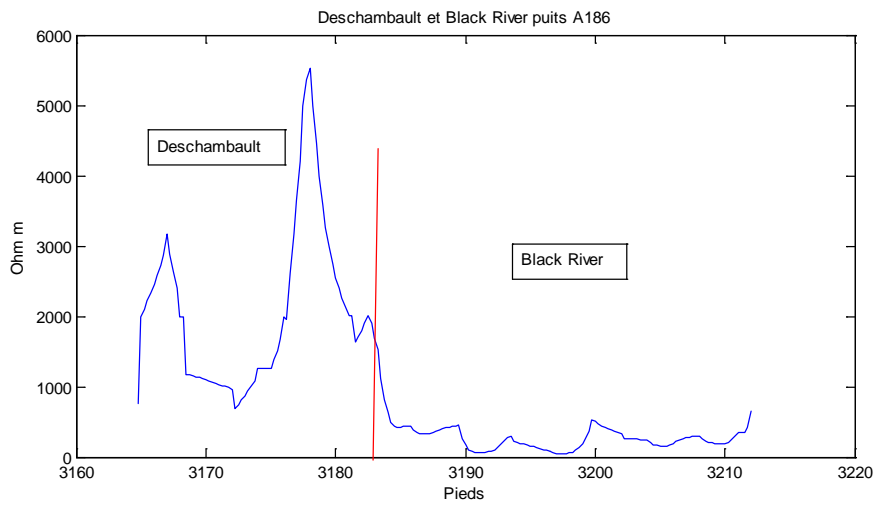
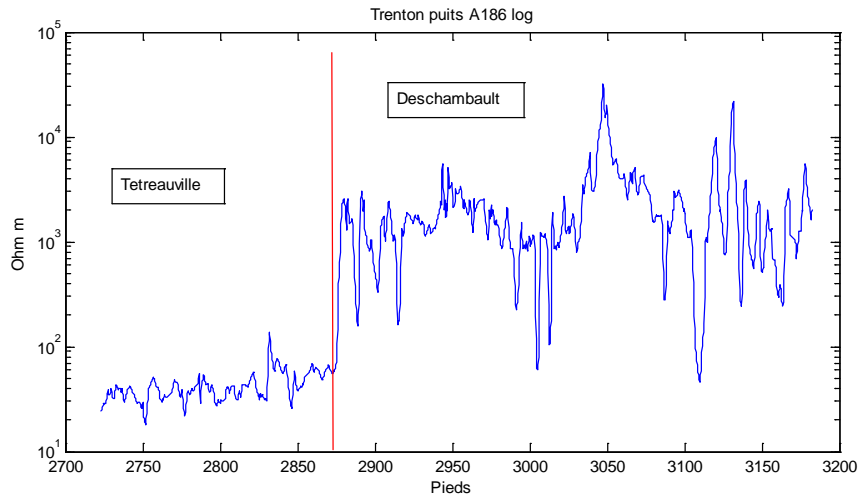
Formations	Moyenne de la résistivité (ohm m)	Écart type de la résistivité (ohm m)	Comportement
Lorraine sup.	14.2	4.3	
Lorraine inf.	19	4.3	Transition plus graduelle que dans le puits A186
Utica			absent
Tétreauville			absent
Deschambault	1100	1100	
Black River	130.7	69.7	
Beauharnois	286	242	
Theresa	511	472	Plus dure à distinguer du Beauharnois que dans le puits A186
Cairnside	87.7	69.8	Lit très résistif à 4250 pieds
Covey Hill	1800	4400	Alternance de lits très résistifs et de lits épais très peu résistifs

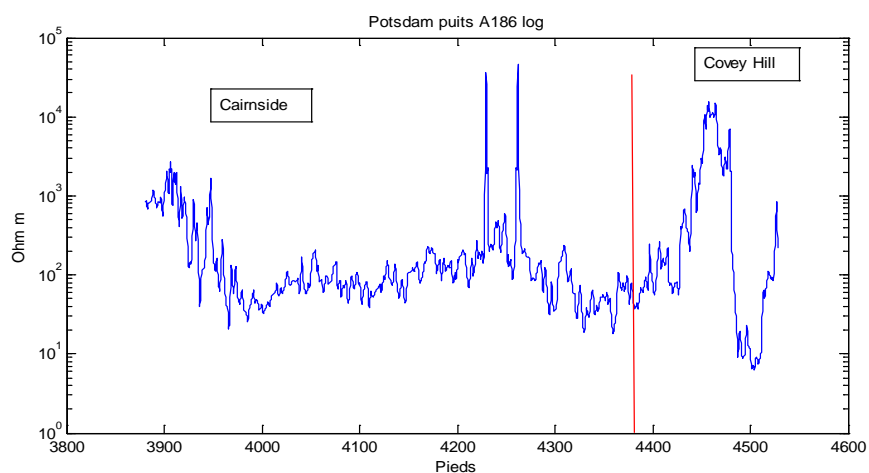
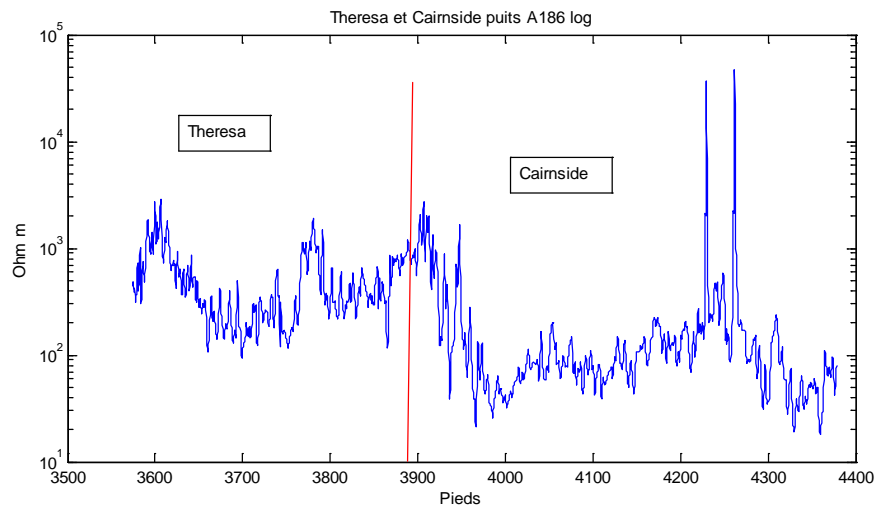
Tableau 6 - Résistivités au puits A199

Formations	Moyenne de la résistivité (ohm m)	Écart type de la résistivité (ohm m)	Comportement
Lorraine sup.	10.3	1.4	
Lorraine inf.	13.9	2.5	remontée
Utica	83	32.8	Transition en montée à partir du Lorraine et en descente vers le Tétreauville
Tétreauville	52.7	24.4	Hausse de 30 à 100 ohm m
Deschambault	1360	953.6	
Black River	187.1	145.4	
Beauharnois	419.3	521.2	
Theresa	419.3	521.2	Le Beekmantown est sans division
Cairnside	55.4	39.9	Transition en descente entre le Beekmantown et le Potsdam
Covey Hill	53.9	46.3	Pas de lits très résistifs

Résistivité des principales unités







Modèle de résistivité 1D (fichier A186.txt)

%Sommet, Résistivité moyenne	
0	10.5
579	16.4
799	144
830	42.5
877	2400
970	249.7
979	454.3
1075	573.4
1192	110
1345	1800