



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9310f**

**Levés électromagnétiques pour l'étude des taliks, lacs First
Landing et Second Landing, Rankin Inlet (Nunavut)**

G.A. Oldenborger

2026

Canada 

COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 9310f

Levés électromagnétiques pour l'étude des taliks, lacs First Landing et Second Landing, Rankin Inlet (Nunavut)

G.A. Oldenborger

2026

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles, 2026

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à

copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir du Dépôt ouvert des sciences et technologie de RNCAN (<https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/>).

Notation bibliographique conseillée

Oldenborger, G.A., 2026. Levés électromagnétiques pour l'étude des taliks, lacs First Landing et Second Landing, Rankin Inlet (Nunavut); Commission géologique du Canada, Dossier public 9310f, 28 p.
<https://doi.org/10.4095/phm8xazv0h>

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

ISSN 2816-7163
ISBN 978-0-660-98554-1
N° de catalogue M183-2/9310F-PDF
<https://doi.org/10.4095/phm8xazv0h>

SOMMAIRE

Dans le cadre d'une étude sur la formation de taliks de lac, des sondages électromagnétiques dans le domaine temporel (TEM) ont été effectués sur le lac First Landing et le long d'une section allant du lac First Landing au lac Second Landing, près de Rankin Inlet, au Nunavut. Le lac Second Landing présente une structure de conductivité électrique correspondant à un sol gelé et non gelé et indiquant un talik de lac d'au moins 100 m de profondeur. Le lac First Landing présente une structure de conductivité électrique plus complexe, qui comporte des anomalies de conductivité élevée pouvant être associées à un pergélisol salin sous-lacustre. Il est difficile d'interpréter la présence d'un talik sous le lac First Landing et la connectivité potentielle des eaux souterraines entre les deux lacs.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	i
TABLE DES MATIÈRES	ii
INTRODUCTION.....	1
ZONE ÉTUDIÉE	1
MÉTHODES	2
RÉSULTATS.....	4
DISCUSSION	6
CONCLUSION	8
REMERCIEMENTS	8
RÉFÉRENCES.....	9
FIGURES.....	11
ANNEXE A	24

INTRODUCTION

Ce dossier public présente des données électromagnétiques dans le domaine temporel (TEM) recueillies sur les lacs First Landing et Second Landing, près de Rankin Inlet, au Nunavut. Le but des levés TEM était de caractériser l'état du pergélisol dans le cadre d'une étude plus vaste sur les taliks de lac (LeBlanc *et al.*, 2022; Sladen *et al.*, 2024). Dans la région de Rankin Inlet, on s'attend à un pergélisol sous-lacustre et à un sol gelé pour les étendues d'eau de moins de 1,1 m de profondeur où le contact entre la glace et le substrat dure assez longtemps pour le maintien d'une température annuelle moyenne inférieure à zéro (LeBlanc *et al.*, 2024). On s'attend toutefois à des taliks (sol non gelé) sous les eaux plus profondes. La profondeur du talik dépend de la taille et de la forme du lac; les lacs les plus grands et les plus profonds verront des taliks ouverts qui pénètrent complètement le pergélisol et rejoignent le réseau d'eaux souterraines sous celui-ci.

Les méthodes géophysiques sensibles à la conductivité électrique, comme les levés TEM, peuvent fournir des données non invasives sur l'état du pergélisol et des eaux souterraines vu le lien étroit entre la conductivité électrique et le changement de phase de l'eau en glace (p. ex., Creighton *et al.*, 2018). Habituellement, l'eau gelée ou le substrat gelé (pergélisol) a une conductivité électrique moindre que l'eau non gelée ou le substrat non gelé (talik). Les levés géophysiques sur la glace de lacs peuvent servir à détecter la présence de taliks de lac, à en estimer la profondeur et à distinguer ceux ouverts de ceux fermés.

ZONE D'ÉTUDE

Le hameau de Rankin Inlet se situe sur la côte ouest de la baie d'Hudson, dans la région de Kivalliq, au Nunavut (Canada) (figure 1). Rankin Inlet se trouve dans une zone de pergélisol continu, où 90 à 100 % du territoire repose sur le pergélisol (Heginbottom *et al.*, 1995). La température annuelle moyenne du sol au plafond du pergélisol varie entre -9,5 et -5,5 °C et l'épaisseur de la couche active, entre 60 et 160 cm (LeBlanc et Oldenborger, 2021). La profondeur de la base du pergélisol varie quant à elle de plusieurs centaines de mètres, notamment selon la proximité aux lacs (Golder Associates Ltd., 2021).

Les lacs First Landing et Second Landing sont à environ 7 km au nord-ouest du hameau de Rankin Inlet. Le lac First Landing a un volume d'environ $4,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ et une profondeur maximale de 17,6 m (Budkewitsch *et al.*, 2011). La profondeur du lac Second Landing est de 6,7 m (Oldenborger, 2024). Le substratum rocheux sous les lacs est en grande partie volcanique, et des roches sédimentaires traversent d'est en ouest le centre des lacs (Golder Associates Ltd., 2021).

La géologie des formations en surface environnantes est de type marine, glaciaire et fluvioglaciaire et d'épaisseur variable; on trouve quelques falaises rocheuses le long des rives (McMartin, 2002). Les deux lacs sont assez grands et profonds pour permettre la formation de taliks et, possiblement, de taliks ouverts (LeBlanc *et al.*, 2024). Cependant, ils présentent tous deux des terrasses peu profondes qui s'étendent jusqu'à plusieurs centaines de mètres des rives et peuvent donc influencer la formation de taliks (figure 1).

MÉTHODES

Du 21 au 24 avril 2024, des données TEM sur la glace et le sol ont été récoltées le long d'une section sur le lac First Landing et d'une section du lac First Landing au lac Second Landing. La figure 1 montre la zone d'étude et les points de sondage. Les sections ont été choisies pour étudier la transition entre les eaux profondes et une terrasse peu profonde sur la rive nord du lac First Landing ainsi que la transition eau-terre-eau et la connectivité hydrogéologique possible entre le lac First Landing et le lac Second Landing.

Collecte des données

Les levés TEM consistent à mesurer l'intensité du champ magnétique transitoire résultant de la coupure rapide du courant dans une boucle émettrice. Les données ont été recueillies avec un récepteur numérique PROTEM-D à 20 fenêtres temporelles, un émetteur TEM47 et une bobine réceptrice à haute fréquence (31,4 m²) fabriqués par Geonics Ltd. Dans tous les cas, l'émetteur utilisait une boucle carrée à bobine unique de 40 m × 40 m en fil de cuivre toronné de calibre AWG 12 avec une résistance mesurée de 0,9 Ω à 16 °C, et le courant était maintenu à 3,0 A. De plus, tous les sondages ont été faits dans une configuration en boucle décalée pour atténuer les effets de polarisation induite associés au fort champ principal au centre de la boucle (Geonics Ltd., 2011). Les sondages ont été effectués à des fréquences de base de 285 Hz, 75 Hz et 30 Hz. La figure 2 présente un schéma de la configuration de levé et un exemple de site. Il y a un chevauchement important dans les intervalles de mesure et les délais de fenêtre pour les fréquences de base utilisées, mais les collectes multiples permettent un contrôle de la redondance ainsi qu'une sélection et un traitement flexibles des données. Les données ont été recueillies sous la forme de trois enregistrements successifs distincts par fréquence de base, qui ont ensuite été empilés pour les temps d'intégration de 8 s (285 Hz), 15 s (75 Hz) et 30 s (30 Hz). Le gain a été réglé de manière variable pour maintenir le bruit ambiant sous ± 5 nV/m² dans les cinq dernières fenêtres de temps à toutes les fréquences de base et pour éviter toute saturation précoce du signal (Geonics Ltd., 2011). Des enregistrements du bruit ambiant (données recueillies en l'absence d'un signal de

l'émetteur) ont été faits sur chaque site pour chaque fréquence de base selon les mêmes paramètres d'empilement et de gain que les données.

Des sondages TEM supplémentaires faits en avril 2023 ont été ajoutés pour couvrir une portion élargie une plus grande proportion des lacs (figure 1). Ils ont été effectués dans une configuration en boucle centrale avec une boucle carrée à bobine unique de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ et des émetteurs TEM47 et TEM57 (Oldenborger, 2024). Seules les données de 2023 provenant de l'émetteur TEM47 sont utilisées ici.

Traitement et inversion

Pour chaque fréquence de base, la tension induite à la bobine réceptrice a été calculée comme étant la tension négative/positive moyenne par fenêtre de temps pour chacun des trois enregistrements. Le niveau de bruit correspondant à chaque fenêtre de temps a été calculé comme étant la valeur maximale de la tension ambiante induite absolue et l'écart-type des trois enregistrements de tension empilés, plus une constante de 0,01 mV représentant la précision des instruments de mesure. On a observé que le bruit ambiant est plutôt aléatoire, mais que les données sont généralement moins reproductibles aux fenêtres tardives et aux fréquences de base moindres.

Les mesures de tension moyenne et le bruit pour chaque fréquence de base ont été ajustés en raison du gain non linéaire (Geonics Ltd., 2011) et normalisés selon le courant et la surface d'émission. La normalisation équivaut à la conversion de la tension de la bobine réceptrice (mV/Am^2) en taux de variation temporelle du champ magnétique (T/s). Après normalisation, les données ont été choisies et combinées en un seul sondage composite. Règle générale, pour bâtir les sondages composites, on a choisi des fenêtres de temps ayant un niveau de bruit de moins de 2 à 3 % pour une ou deux fréquences de base (p. ex., 285 Hz et 30 Hz), et ce, sans chevauchement afin d'avoir la plus grande durée de mesures à faible bruit. Les courbes de décroissance composites ont été converties en courbes de résistivité apparente en temps long (Spies et Eggers, 1986), ce qui peut être utile pour comparer les sondages et repérer les caractéristiques des données. La figure 3 présente un exemple de création d'un sondage composite pour le site 2401.

Les sondages composites TEM ont été inversés individuellement avec le code EM1DTM pour illustrer la conductivité électrique (Farquharson et Oldenburg, 1993). Ce code repose sur un algorithme d'inversion 1D par moindres carrés, qui utilise un paramétrage multicouche. Les contraintes L^2 (méthode des moindres carrés ou « lissage ») et L^1 (méthode de longueur minimale ou « bloc ») ont été appliquées à la structure de modèle pour l'ajustement des données

(Farquharson et Oldenburg, 1998). Le modèle a été surparamétré avec 30 couches où l'épaisseur augmente d'un facteur de 1,1 à partir de 1 m sous la surface jusqu'à environ 11 m à 100 m de profondeur. Les modèles de départ et de référence étaient homogènes, avec une conductivité électrique égale à celle du demi-espace le mieux adapté aux données. La fiabilité du modèle a été évaluée en fonction du bruit des données, des écarts de données et de la stabilité du modèle, mesurée selon l'indice de profondeur de pénétration (Oldenburg et Li, 1999). Pour faciliter l'interprétation, une inversion paramétrique à quatre couches a aussi été appliquée aux sondages TEM (annexe A).

Les deux algorithmes d'inversion comprennent une pondération variable du bruit et visent l'ajustement des données proportionnellement au bruit selon le principe d'écart. En réalité, il est habituellement acceptable d'arriver à des erreurs de prévision supérieures au bruit des données, étant donné le manque de cohérence possible entre les données de différentes fréquences de base et la sous-estimation fréquente du bruit, surtout pour les hautes fréquences et les premières fenêtres horaires pour lesquels les données sont hautement reproductibles, mais propices à des erreurs systématiques comme des erreurs de géométrie ou le non-respect de l'hypothèse 1D.

RÉSULTATS

Les figures 4 et 5 illustrent les modèles de conductivité électrique obtenus pour le site 2401. Le modèle L^2 donne le meilleur ajustement des données; il comprend une couche conductrice commençant à environ 18 m de profondeur et une couche résistive commençant à environ 55 m de profondeur. Le modèle L^1 ressemble au modèle L^2 , mais est plus résistant en profondeur. Un modèle supplémentaire L^{1*} donne un ajustement raisonnable des données, mais présente une conductivité très élevée ($> 10^6$ mS/m) après 40 m de profondeur. Des modèles similaires, notamment l'anomalie de conductivité élevée, sont obtenus pour l'inversion à quatre couches (figure 5). Les erreurs de prévision pour les inversions à quatre couches dépassent systématiquement celles des inversions multicouches, étant donné le degré de liberté restreint du modèle.

Les différences entre les modèles obtenus aident à évaluer l'incertitude du modèle. L'indice de profondeur de pénétration illustré à la figure 6 pour le site 2401 aide aussi à mesurer cette incertitude. Pour ce site, il est évident que l'incertitude du modèle augmente rapidement après 50 m de profondeur, ce qui est près du point de départ des modèles aux figures 4 et 5 et de la profondeur de l'anomalie de conductivité élevée.

On observe de nombreux cas de conductivité très élevée dans les inversions TEM de Rankin Inlet, encore plus dans les meilleures conditions initiales de conduction. Les modèles à conductivité de plus de 10^5 mS/m sont considérés comme irréalistes et ne sont pas acceptés comme solutions finales (p. ex., Palacky, 1998). Dans certains cas, il est possible d'éviter ces modèles par le choix de la fréquence de base, la révision des données à fort bruit ou la sélection de conditions initiales de plus forte résistance. Parfois, les artéfacts de conductivité élevée demeurent, mais peuvent habituellement être atténués par le retrait des données tardives.

D'ailleurs, les rapides hausses tardives de la résistivité apparente indiquent des effets 3D dans les données causés par la structure conductrice hors boucle (Newman *et al.*, 1987). Lorsqu'on supprime les données au-delà de toute hausse importante dans la courbe de résistivité apparente, on peut ajuster et interpréter adéquatement les modèles environ jusqu'à la profondeur de la structure 3D problématique (Newman *et al.*, 1987). On peut voir ce processus pour le site 2404 à la figure 7, où une hausse importante de la résistivité apparente se produit à environ 0,1 ms. L'utilisation de la courbe de sondage composite complète entraîne un mauvais ajustement des données, de fortes oscillations du modèle à faible profondeur et un emballement de la conductivité vers 30 à 40 m de profondeur. En se limitant aux données des fenêtres avant 0,1 ms, on améliore grandement l'adéquation des données, on réduit les oscillations et on voit clairement le dessus d'une couche à conductivité élevée (mais raisonnable) à 32 m de profondeur, après quoi le modèle devient incertain.

Une interpolation horizontale des modèles découlant des inversions 1D a été faite afin de créer des pseudo-sections 2D pour chaque type de modèle. Les résultats se trouvent aux figures 8 à 10 pour la zone nord, du centre du lac First Landing jusqu'à la rive, et aux figures 11 à 13 pour la section à l'est, du lac Second Landing au lac First Landing. Les pseudo-sections 2D sont pour la plupart cohérentes d'un type de modèle à l'autre; les modèles L^2 offrent la structure de modèle la plus complexe, tandis que ceux à quatre couches offrent celle la plus simple. Le degré d'adéquation des données varie beaucoup; il est d'ailleurs particulièrement mauvais pour le site 2416, qui a pourtant une structure similaire à celle des sondages adjacents (p. ex., figure 12).

Pour le site 2401, sur le lac First Landing, la profondeur de l'eau est d'environ 6 m (Budkewitsch *et al.*, 2011), l'épaisseur de la glace est d'environ 1,7 m, et la conductivité de l'eau sur place est d'environ 20 mS/m (Oldenborger, 2024; Oldenborger, 2025). La conductivité électrique obtenue est de 14 à 18 mS/m à une profondeur de 16 m (figure 9), ce qui suggère l'absence d'une différence notable de la conductivité entre l'eau du lac et le substrat (non gelé). Sous le fond du lac, il est évident qu'il y a un conducteur peu profond (~ 100 à 500 mS/m) qui augmente en profondeur, de

très près de la surface sur le littoral (site 2405) à 20 à 30 m de profondeur au large (sites 2401 et 2312). Les données laissent aussi croire à la présence de conducteurs plus profonds et plus puissants (10^3 à 10^4 mS/m) aux sites 2403 à 2405, sous la terrasse du lac, et au site 2312 (figure 9). Cependant, ces conducteurs sont proches de la limite de profondeur de pénétration ou sous celle-ci et sont associés à des écarts accrus des données.

Pour le lac Second Landing, il semble y avoir une petite différence dans la conductivité électrique du fond du lac aux sites 2315 et 2316 (figure 12). Cependant, la couche de surface à conductivité plus élevée semble s'épaissir sous la terrasse lacustre (site 2319) et s'étend sur la partie terrestre (site 2418). Il ne semble pas y avoir de conducteur peu profond sous le fond du lac Second Landing. Les modèles obtenus suggèrent plutôt une hausse générale de la conductivité à mesure que la profondeur augmente sous le fond du lac (sites 2315 et 2316). La rive est du lac Second Landing se caractérise par un sol résistif (sites 2416 à 2418), tandis que la rive ouest du lac First Landing présente une anomalie de conductivité élevée (sites 2411 à 2413) semblable à celle de la rive nord (figure 9). Les sondages à grande boucle sur le lac Second Landing (sites 2315 à 2317) n'indiquent pas d'emballement de la conductivité en profondeur, contrairement à ce qui a été observé sur le lac First Landing (site 2312).

DISCUSSION

Les pseudo-sections 2D de conductivité électrique suggèrent des conditions de pergélisol diverses et complexes pour les lacs First Landing et Second Landing. Selon l'interprétation, la section étudiée du lac Second Landing (p. ex., figure 13) présenterait un talik (sol non gelé) à une profondeur d'au moins 100 m, qui est plus conducteur que le pergélisol littoral. La hausse de la conductivité en profondeur sous le lac Second Landing (sites 2415 et 2416) pourrait s'expliquer par une transition entre des eaux douces de surface et des eaux salines plus profondes (p. ex., Golder Associates Ltd., 2021). On observe une accentuation du talik et de la conductivité du sol sous les eaux plus profondes du côté est du lac Second Landing (site 2315) ainsi qu'une transition vers un sol gelé résistif sous la terrasse ouest (site 2317). Les sondages littoraux du côté est (sites 2416 à 2418) démontrent une transition vers un sol plus conducteur sous 65 à 75 m de profondeur, ce qui laisse croire que le talik pourrait s'étendre sous la rive est du lac Second Landing. La structure de conductivité du lac Second Landing semble dans l'ensemble concorder avec le modèle conceptuel simple de sol non gelé conducteur (talik) et de sol gelé résistif (pergélisol terrestre). On ne connaît pas la nature de la couche de surface à conductivité moyenne, mais elle pourrait être liée à des sédiments meubles recouvrant le substratum rocheux.

En revanche, le lac First Landing (p. ex., figures 10 et 13) présente une couche conductrice peu profonde, débutant à 20 m de profondeur, qui se voit dans tous les sondages et devient moins profonde sous les terrasses lacustres des deux rives. Hors terrasses, la couche conductrice repose sur un sol résistif indiquant un sol gelé ou de l'eau douce (sites 2401 et 2402 et sites 2408 à 2410, sauf le site 2312, qui se trouve sous la profondeur de pénétration). Sous les terrasses et sous la rive ouest du lac First Landing, la couche conductrice peu profonde repose sur un sol aux anomalies de conductivité encore plus importantes (sites 2403 à 2405 et sites 2411 à 2413). Comme le lac First Landing est plus profond que son homologue, si un talik se trouve au lac Second Landing, il en serait de même pour le lac First Landing, mais les signatures géophysiques diffèrent. Il est peu probable que les variations dans le substratum rocheux ou la géologie de surface expliquent la conductivité élevée observée. Cependant, d'autres études dans la région ont révélé la présence de pergélisol salin, ce qui pourrait expliquer les structures de conductivité électrique observées sous le lac First Landing.

Le pergélisol salin a une conductivité électrique élevée en raison de la salinité accrue de l'eau interstitielle, du point de congélation abaissé et de la teneur supérieure en eau non gelée. Il complique le modèle conceptuel simple des taliks et peut entraîner une réponse hors boucle dans les sondages TEM, illustrée dans les données TEM sous forme de fortes hausses de la résistivité apparente (p. ex., figure 7, site 2404). Même après l'élimination des données tardives affectées, l'incidence de la conductivité élevée hors boucle peut demeurer, et la présence d'effets 3D sur les modèles TEM 1D peut s'avérer majeure et contre-intuitive. On observe d'ailleurs les artéfacts des effets 3D suivants dans l'inversion TEM 1D : couches à conductivité élevée, emballement de la conductivité et structure de modèle complexe, comme des couches très minces ou de fortes oscillations entre conductivité et résistivité (Newman *et al.*, 1987; Yang et Oldenburg, 2012). Par ailleurs, d'autres données géophysiques indiquent la présence d'un pergélisol salin sous la terrasse nord du lac First Landing (Oldenborger, 2025). Une zone isolée et peu profonde de pergélisol salin présentant une conductivité élevée sous les terrasses lacustres du lac First Landing pourrait entraîner des effets 3D tels qu'un artéfact conducteur peu profond persistant sur le lac, bien qu'il reste à vérifier cette hypothèse avec une modélisation synthétique.

La polarisation induite (PI) a également été identifiée comme une source potentielle de complexification des modèles et des sondages TEM (Lorentzen *et al.*, 2024). Même avec une configuration en boucle décalée, les effets de PI peuvent demeurer dans le pergélisol et fausser l'interprétation s'ils ne sont pas volontairement pris en compte. Ils sont surtout influencés par la surface à proximité et se traduisent généralement par des transitoires négatifs ou des inversions de signe dans la décroissance TEM à des moments tardifs (Smith et West, 1989; Macnae, 2016).

Même si l'on observe des inversions de signe à des moments tardifs dans les données TEM de Rankin Inlet, les données négatives ne dépassent jamais le bruit ambiant, et ni les couches à conductivité élevée ni l'emballement de la conductivité ne figurent parmi les artéfacts relevés dans la contamination des données TEM par la PI. On note des inversions de signe à des moments précoces dans les données TEM de Rankin Inlet (figure 7), mais elles sont associées à la géométrie décalée et à l'inversion de signe du champ magnétique induit causée par la diffusion lente du courant sur un sol conducteur (Ward et Hohmann, 1988). Sur un sol suffisamment résistif, la diffusion du courant est assez rapide pour éviter une inversion de signe (figure 3). Ainsi, le pergélisol salin hors boucle peut avoir un effet important par son influence sur le mouvement négatif-positif, qui est difficile à modéliser avec précision.

CONCLUSION

Des sondages électromagnétiques dans le domaine temporel (TEM) ont été effectués sur le lac First Landing et le long d'une section allant du lac First Landing au lac Second Landing, à proximité de Rankin Inlet, au Nunavut. Les résultats de levé montrent des variations de la conductivité électrique indiquant la présence de sols gelés et non gelés et un possible pergélisol salin sous-lacustre. Le lac Second Landing présente une structure de conductivité électrique correspondant au modèle conceptuel de sol gelé et non gelé et indique un talik d'au moins 100 m de profondeur. Le talik s'étendrait peut-être sous la rive est du lac Second Landing. Pour sa part, le lac First Landing présente une structure de conductivité électrique complexe, possiblement due à un pergélisol salin causant les artéfacts 3D dans les inversions TEM 1D. Il est difficile d'interpréter la présence d'un talik sous le lac First Landing et la connectivité potentielle des eaux souterraines entre les deux lacs.

REMERCIEMENTS

Dans le cadre du Programme GEM-GéoNord de Ressources naturelles Canada. Données recueillies avec l'aide de C. Duchesne. Données de relevé des glaces et de profondeur de lac fournies par W. Sladen. Révision interne par B. Dietiker.

RÉFÉRENCES

- Budkewitsch, P., Prévost, C., Pavlic, G., Pregitzer, M., 2011. Description of water depth survey datasets from Rankin Inlet, Nunavut. Geological Survey of Canada, Open File 6751.
<https://doi.org/10.4095/288667>
- Creighton, A.L., Parsekian, A.D., Angelopoulos, M., Jones, B.M., Bondurant, A., Engram, M., Lenz, J., Overduin, P.P., Grosse, G., Babcock, E., Arp, C.D., 2018. Transient electromagnetic surveys for the determination of talik depth and geometry beneath thermokarst lakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 9310–9323.
<https://doi.org/10.1029/2018JB016121>
- Farquharson, C.G., Oldenburg, D.W., 1993. Inversion of time-domain electromagnetic data for a horizontally layered Earth. *Geophysical Journal International* 114, 433–442.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb06977.x>
- Farquharson, C.G., Oldenburg, D.W., 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophysical Journal International* 134, 213–227.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00555.x>
- Geonics Ltd., 2011. PROTEM 47D Operating Manual for 20/30 Gate Model.
- Golder Associates Ltd., 2021. Summary of Hydrogeology Existing Conditions, Meliadine Extension. Report No. 20136436-855-R-ExistingConditionsReport-Rev3, Agnico Eagle Mines Limited.
- Heginbottom, J.A., Dubreuil, M.H., Harker, P.T., 1995. Canada, Permafrost. *National Atlas of Canada*, 5th ed., Plate 2.1, MCR 4177.
- Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., Wright, P.E., 1998. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal of Optimization* 9, 112–147.
<https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
- LeBlanc, A.-M., Chartrand, J., Smith, S.L., 2022. Regional assessment of the presence of taliks below Arctic lakes, Nunavut. Geological Survey of Canada, Scientific Presentation 138.
<https://doi.org/10.4095/330205>
- LeBlanc, A-M, Sladen, W.E, Faucher, B., 2024. Lake-bottom temperature on shallow and deep terraces for sublacustrine open talik assessment near Rankin Inlet, Nunavut, Canada. *International Conference on Permafrost*, 378–379.
- Lorentzen, T.H., Kass, M.A., Scheer, J., Tomaškovičová, S., Christiansen, A.V., Maury, P.K., Ingeman-Nielsen, T., 2024. Exploring the challenges of interpreting near-surface towed TEM data on saline permafrost. *Geophysics* 1–51. <https://doi.org/10.1190/geo2023-0221.1>
- Macnae, J., 2016. Quantifying airborne induced polarization effects in helicopter time domain electromagnetics. *Journal of Applied Geophysics* 135, 495–502.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.10.016>

- McMartin, I. 2002. Surficial geology, Rankin Inlet, Nunavut. Geological Survey of Canada, Open File 4116. <https://doi.org/10.4095/299616>
- Newman, G.A., Anderson, W.L., Hohmann, G.W., 1987. Interpretation of transient electromagnetic soundings over three-dimensional structures for the central-loop configuration. *Geophysical Journal International* 89, 889–914.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb05200.x>
- Oldenborger, G.A., 2024. Time-domain electromagnetic soundings for talik investigations, Rankin Inlet, Nunavut. Geological Survey of Canada, Open File 9170.
<https://doi.org/10.4095/p60hysa40q>
- Oldenborger, G.A., 2025. Electromagnetic mapping of sublacustrine saline permafrost, Rankin Inlet, Nunavut, Nunavut. Geological Survey of Canada, Open File 9289.
<https://doi.org/10.4095/pqunx9q1bk>
- Oldenburg, D., Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403–416. <https://doi.org/10.1190/1.1444545>
- Palacky, G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets, in: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, 53–129.
- Sladen, W.E., LeBlanc, A.-M., Chartrand, J., van der Sanden, J., 2024. Using RADARSAT constellation mission imagery to support talik mapping, Rankin Inlet, Nunavut, Canada. *Proceedings of the International Conference on Permafrost*, 390–397.
- Smith, R.S., West, G.F., 1989. Field examples of negative coincident-loop transient electromagnetic responses modeled with polarizable half-planes. *Geophysics* 54, 1491–1498.
<https://doi.org/10.1190/1.1442613>
- Spies, B.R., Eggers, D.E., 1986. The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics* 51, 1462–1471. <https://doi.org/10.1190/1.1442194>
- Ward, S.H., Hohmann, G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications, in: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, 53–129.
- Yang, D., Oldenburg, D.W., 2012. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit. *Geophysics* 77, B23–B34.
<https://doi.org/10.1190/geo2011-0194.1>

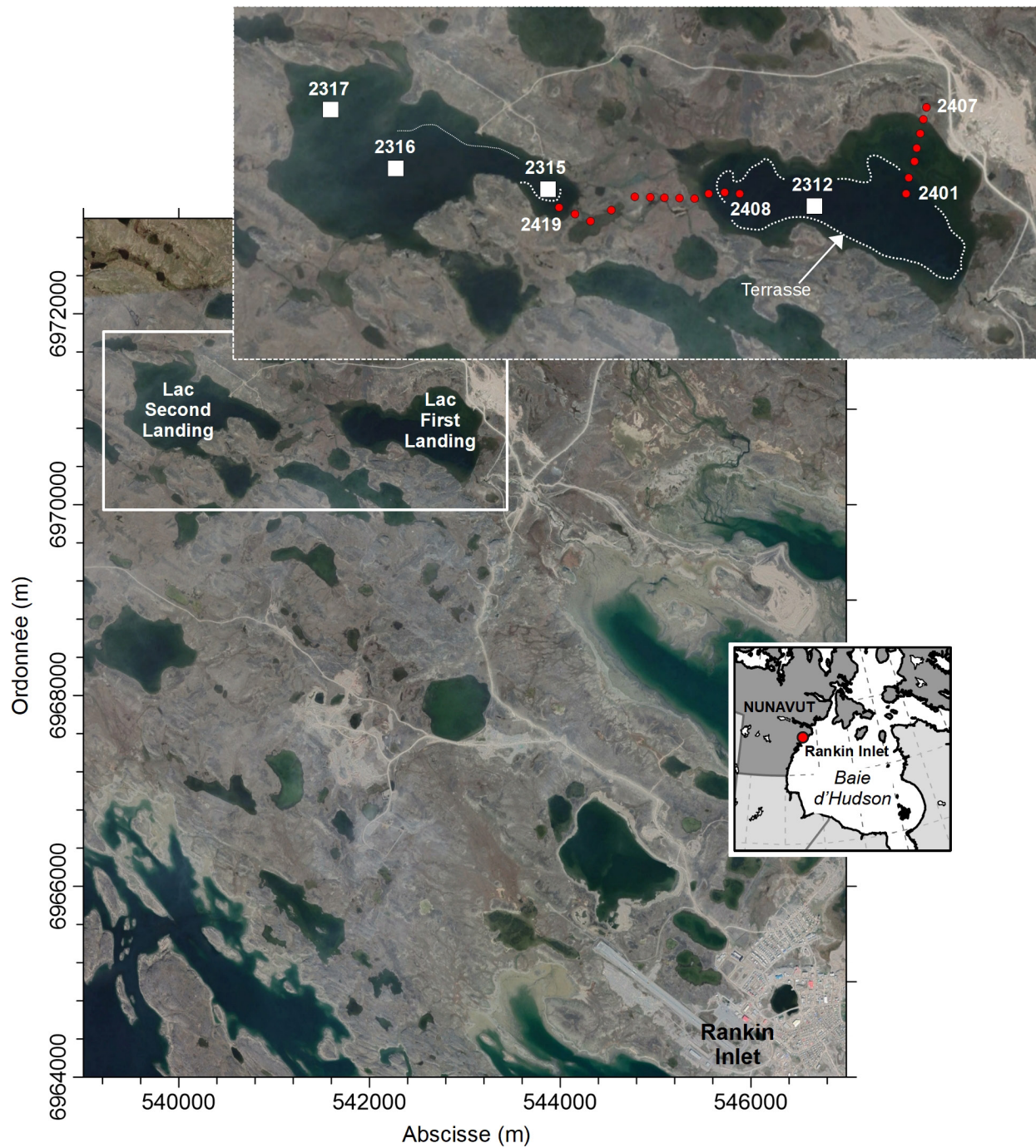


Figure 1. Zone d'étude près de Rankin Inlet (Nunavut). Les emplacements des sondages sur les lacs First Landing et Second Landing sont représentés par des points rouges. Les sondages supplémentaires de l'étude d'Oldenborger (2024) sont représentés par des carrés blancs. Coordonnées d'ordonnée (S-N) et d'abscisse (W-E), WGS84, zone UTM 15N. Image d'arrière-plan : Google Earth, © 2023 Maxar Technologies, © 2023 TerraMetrics.

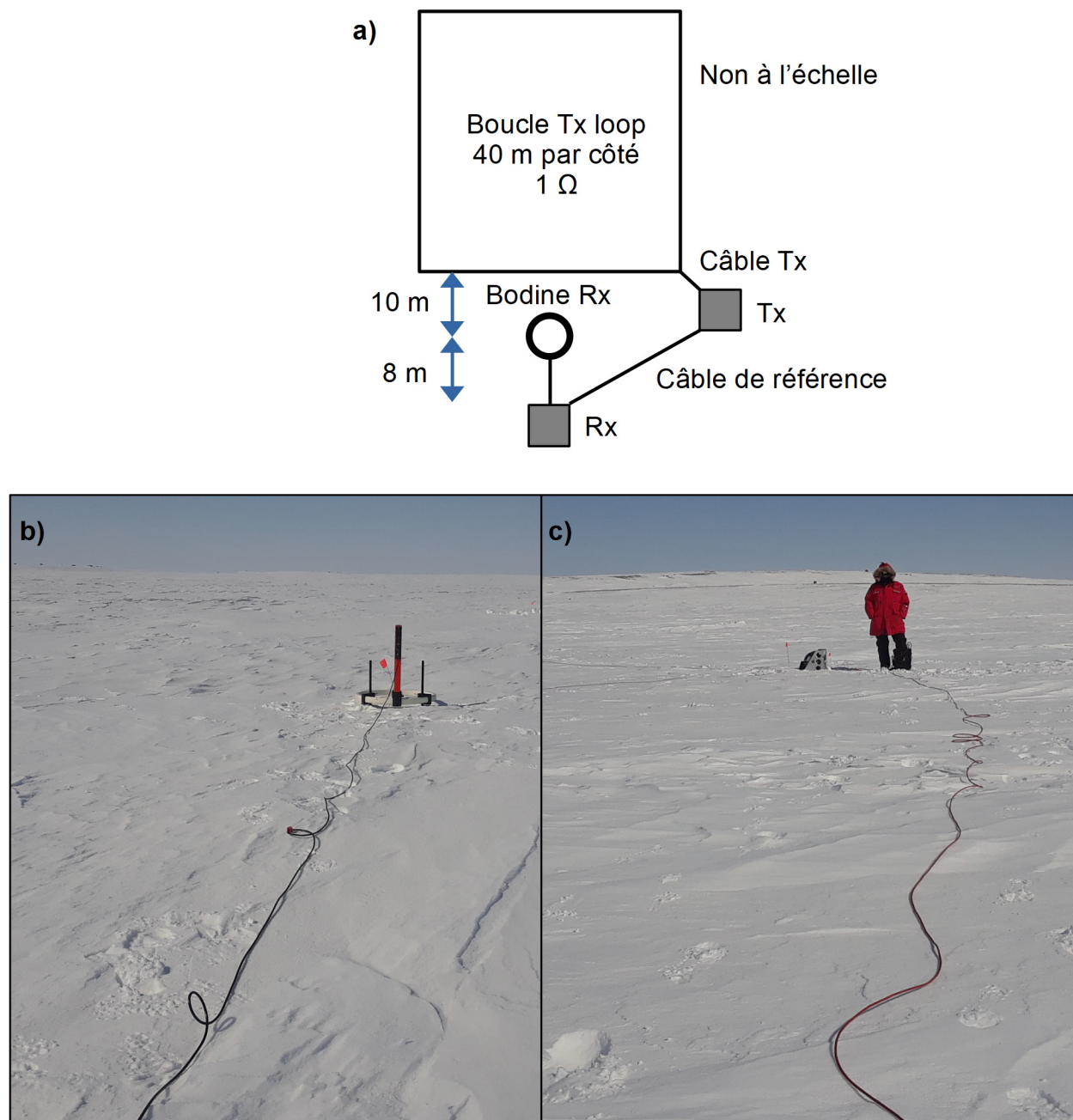


Figure 2. a) Schéma de la configuration des sondages TEM (pas à l'échelle). b) Vue en direction sud vers la bobine du récepteur au site 2403, lac First Landing. c) Vue en direction nord-est vers l'émetteur et l'opérateur au site 2403, lac First Landing. Photographies de G. Oldenborger.

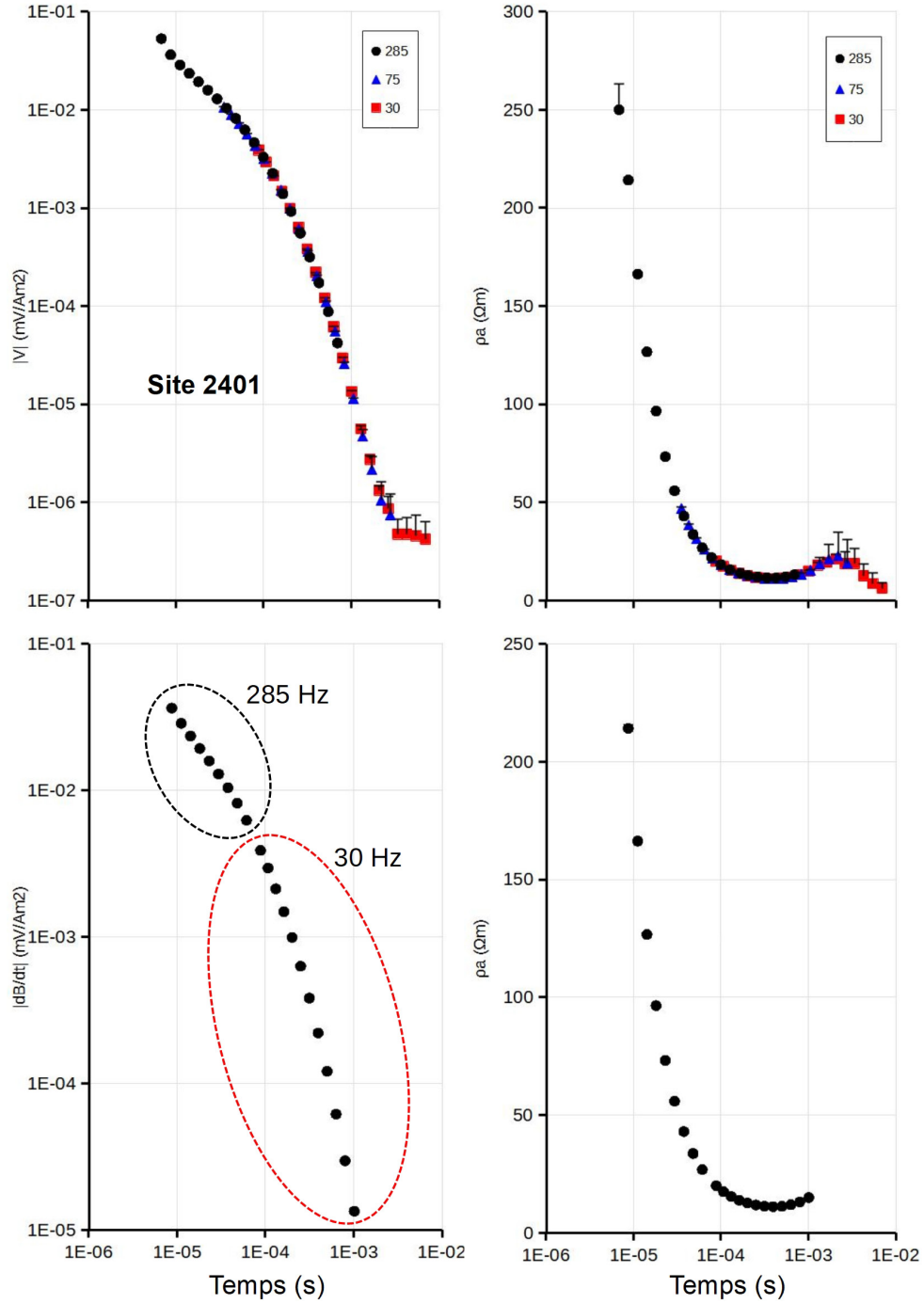


Figure 3. Création de courbes de sondages composites et de résistivité apparente pour le site 2401. Haut : Tension normalisée du récepteur en fonction du temps (20 fenêtres) pour les trois fréquences de base (à gauche) et conversion en résistivité apparente (à droite). Bas : Courbe de décroissance composite créée à partir des fenêtres 2 à 10 à 285 Hz et des fenêtres 1 à 12 à 30 Hz (à gauche) et conversion en résistivité apparente (à droite). Le bruit de mesure maximal pour la courbe composite est de 2,6 % avec une tension résolue minimale d'environ 1×10^{-5} mV/Am² à 1 ms.

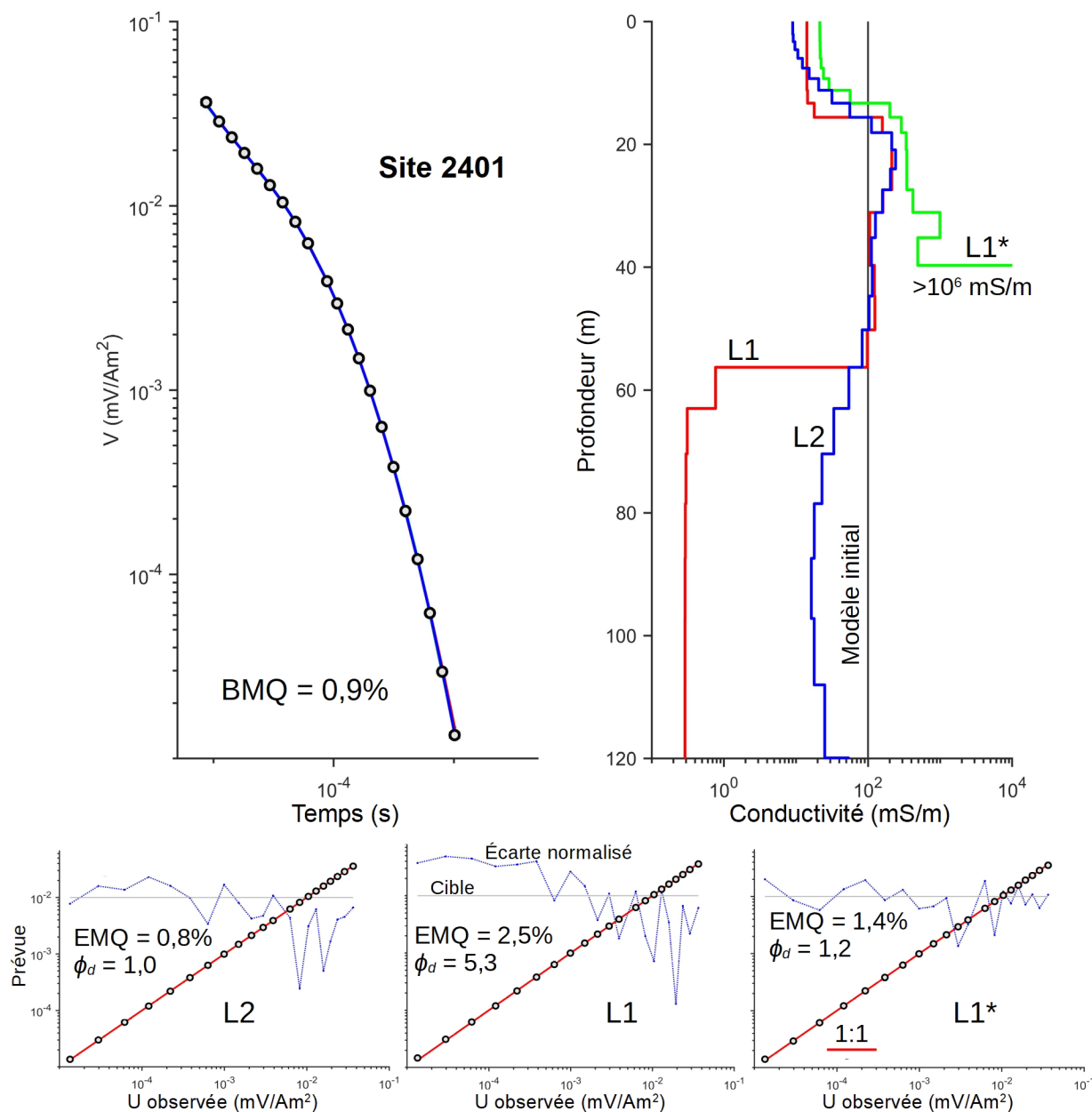


Figure 4. Inversions multicouches pour le site 2401. Haut : Sondage composite (à gauche) et modèles de conductivité électrique multicouches obtenus par inversion (à droite). Les modèles représentés sont le modèle L^2 , le modèle L^1 et un modèle L^1^* obtenu à l'aide d'un modèle initial conducteur. Bas : On ne voit aucune différence entre les données prévues et celles observées. L'erreur moyenne quadratique (EMQ) des données prévues est comparable au bruit moyen quadratique (BMQ).

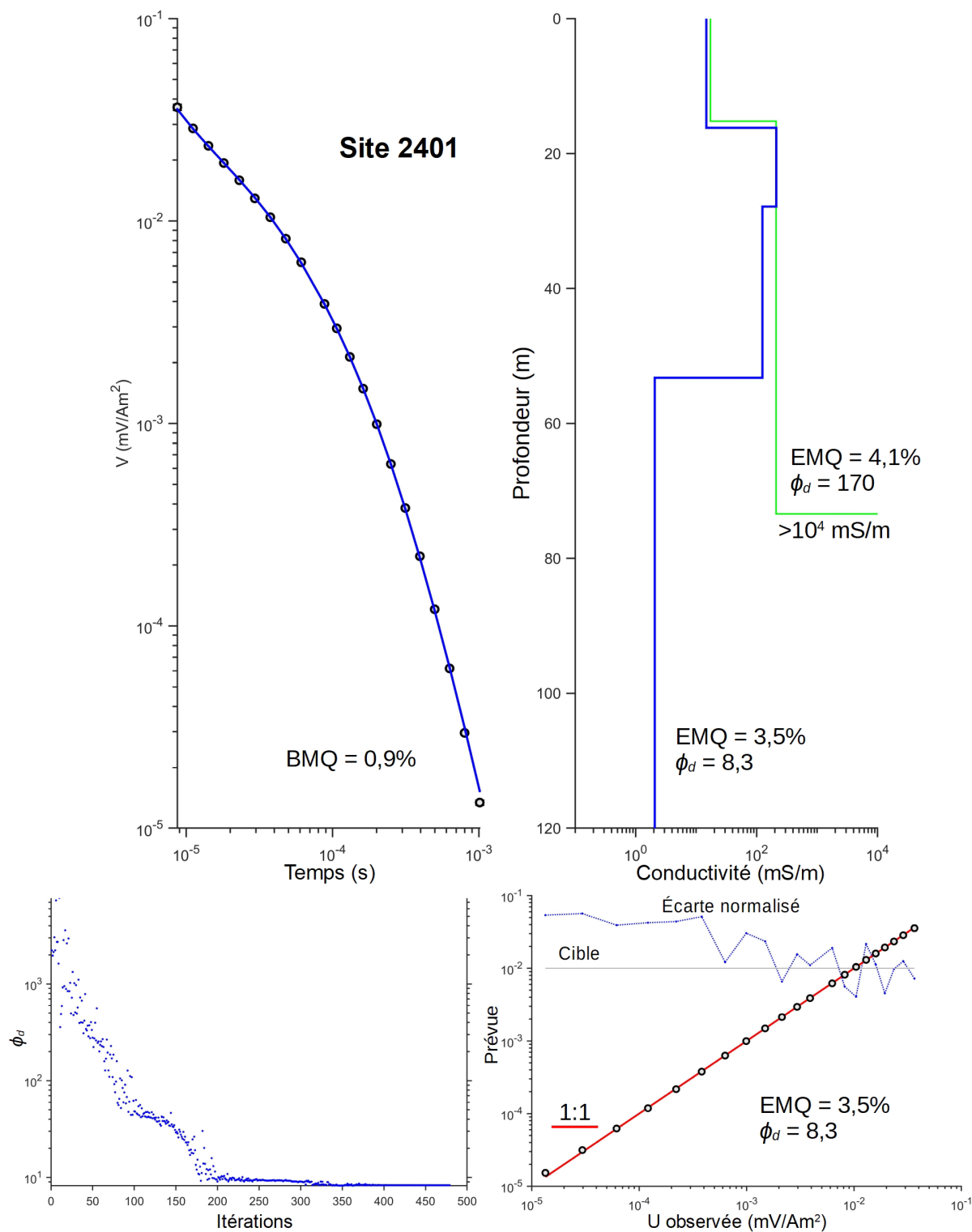


Figure 5. Inversions à quatre couches pour le site 2401. Haut : Sondage composite (à gauche) et modèles de conductivité électrique obtenus par inversion (à droite). Les modèles présentés correspondent aux solutions obtenues à partir des conditions initiales données par les modèles L^1 (bleu) et L^{1*} (vert) de la figure 4.

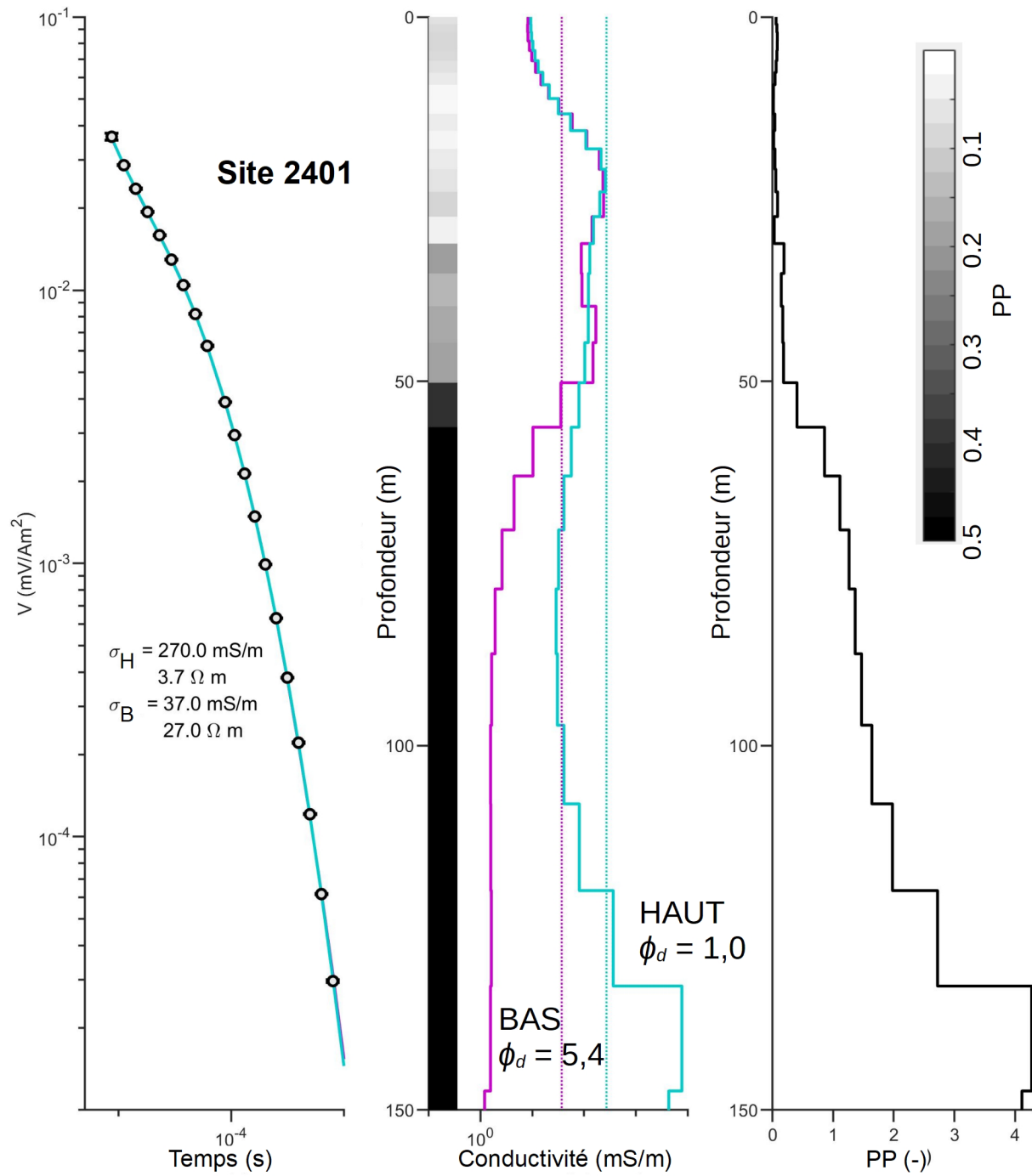


Figure 6. Indice de profondeur de pénétration (PP) pour le site 2401 obtenu par inversion à l'aide de modèles de référence côté haut et côté bas.

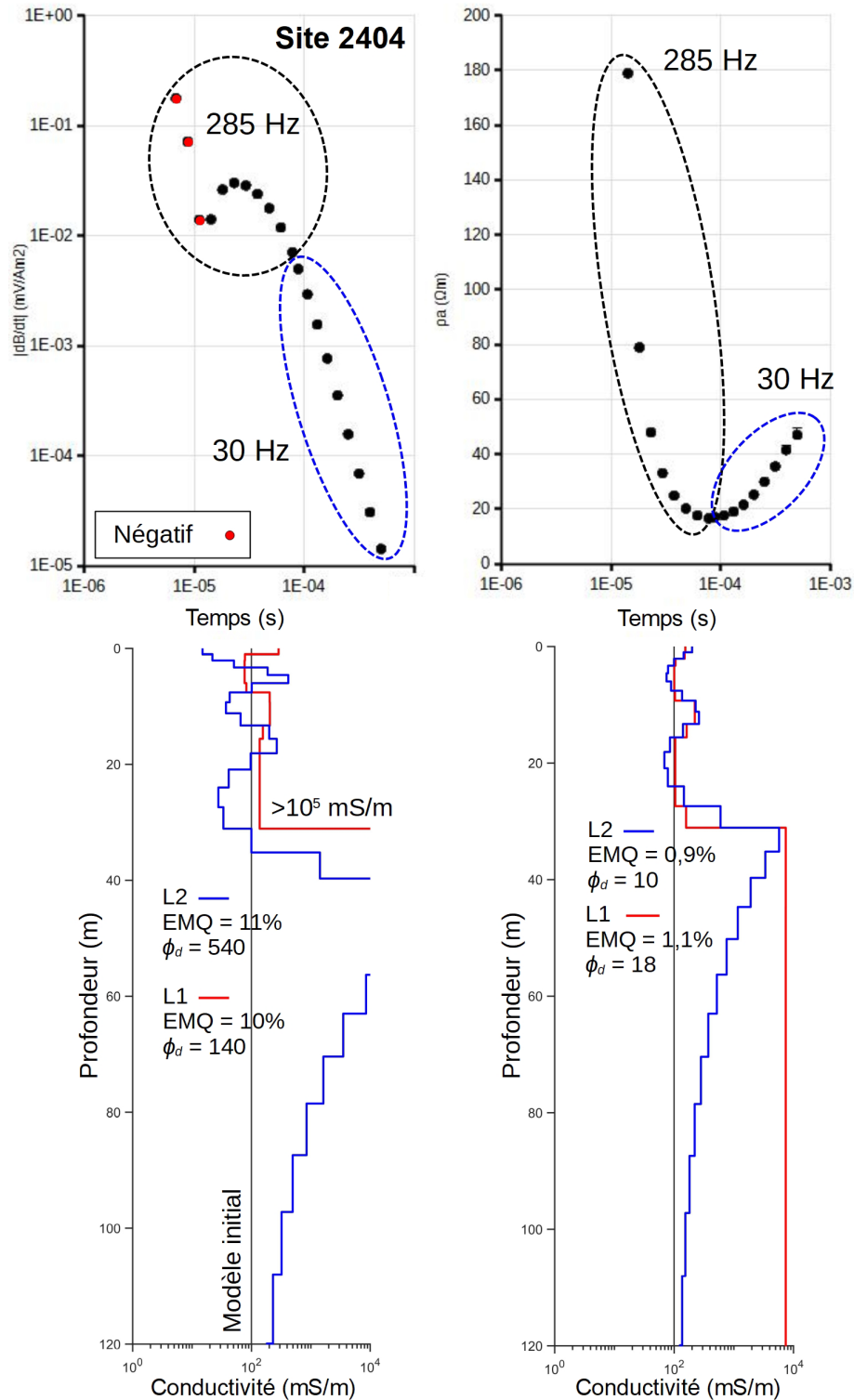


Figure 7. Site 2404. Haut : Sondage composite (à gauche) et courbe de résistivité apparente (à droite) créée à partir des fenêtres 1 à 11 à 285 Hz et des fenêtres 1 à 7 à 30 Hz. Bas : Modèles de conductivité électrique multicouches obtenus par inversion pour l'ensemble du sondage composite (à gauche) et pour la fréquence de 285 Hz seulement (à droite).

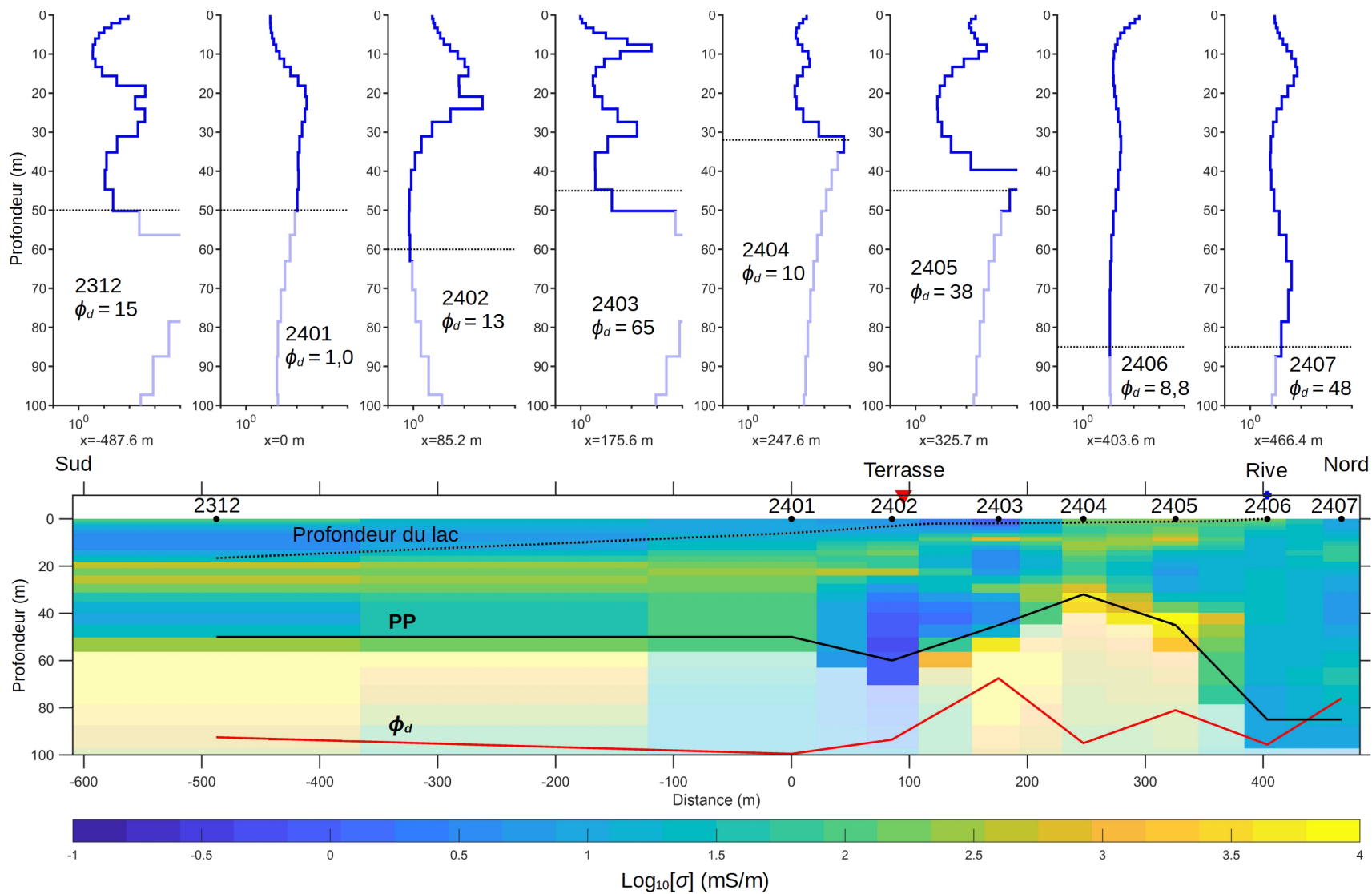


Figure 8. Section de conductivité du sud au nord sur le lac First Landing, du centre du lac à la rive nord. Modèles 1D multicouches L^2 interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

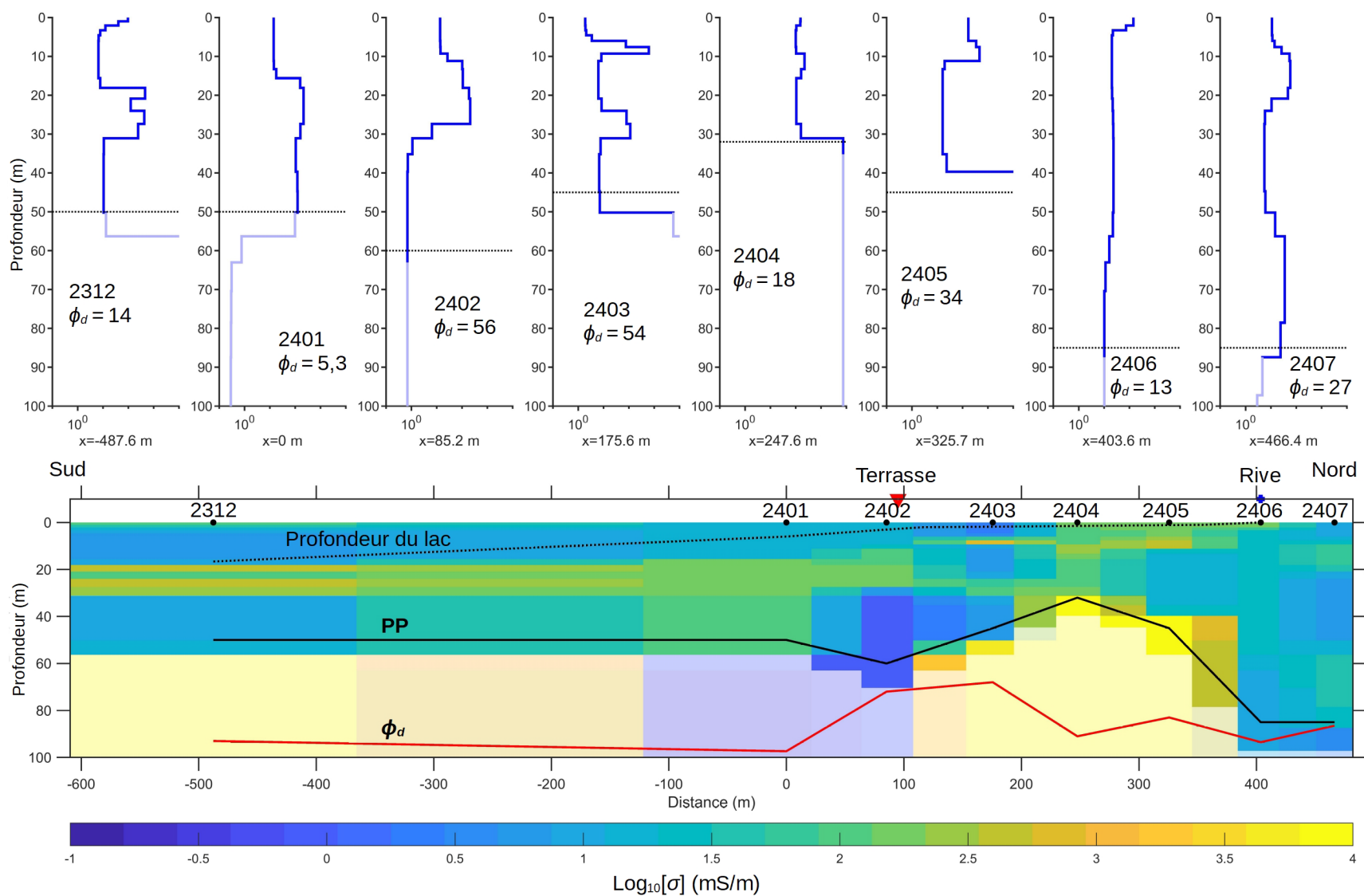


Figure 9. Section de conductivité du sud au nord sur le lac First Landing, du centre du lac à la rive nord. Modèles 1D multicouches L^1 interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

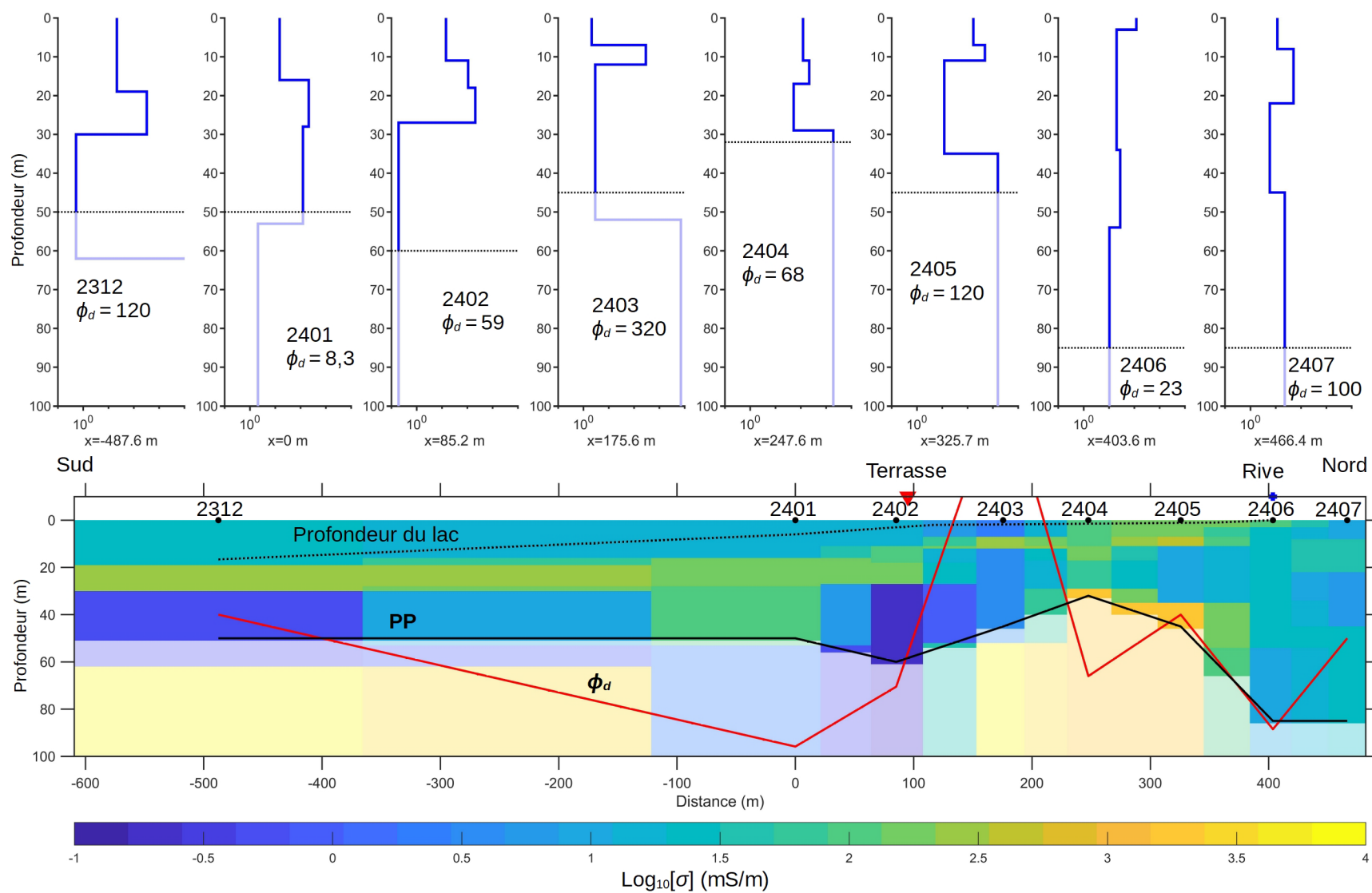


Figure 10. Section de conductivité du sud au nord sur le lac First Landing, du centre du lac à la rive nord. Modèles 1D à quatre couches interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

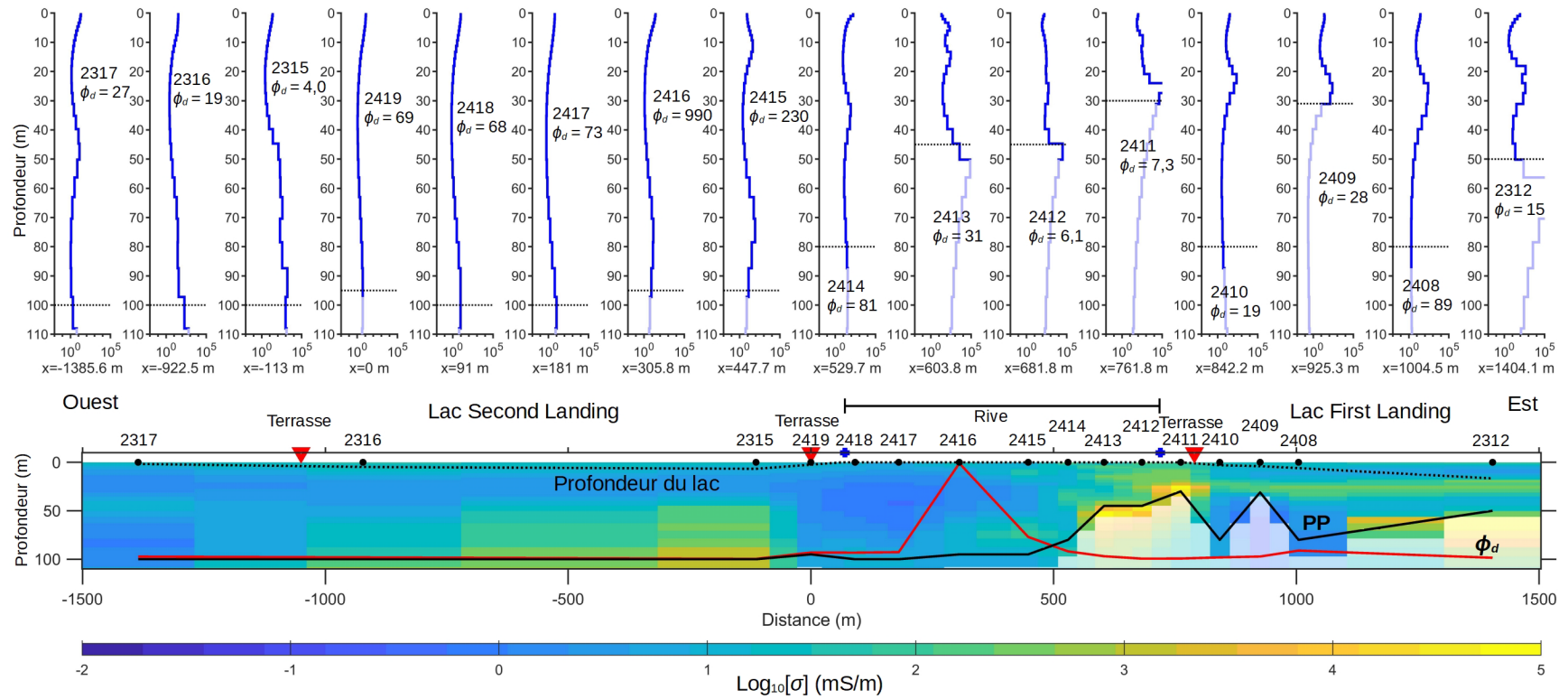


Figure 11. Section de conductivité d'ouest en est du lac Second Landing au lac First Landing. Modèles 1D multicouches L^2 interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

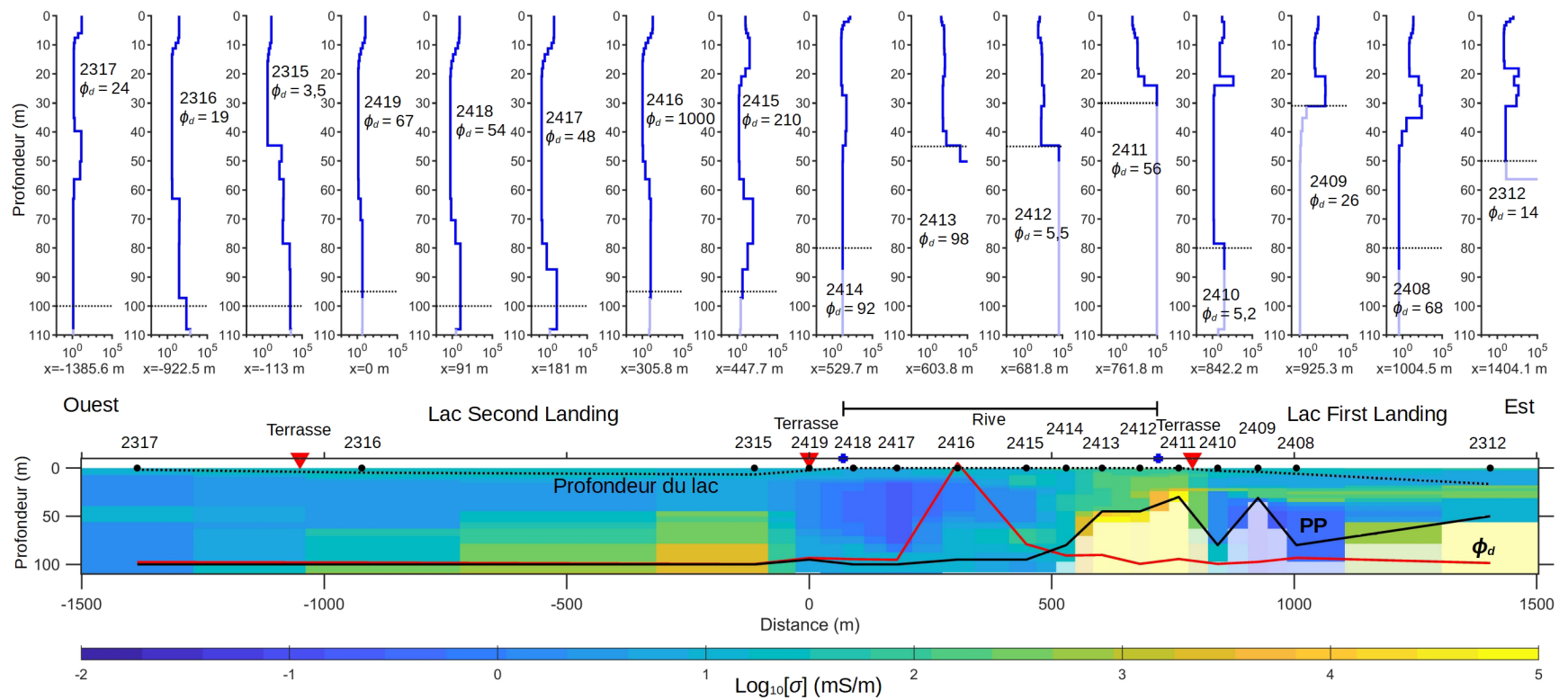


Figure 12. Section de conductivité d'ouest en est du lac Second Landing au lac First Landing. Modèles 1D multicouches L^1 interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

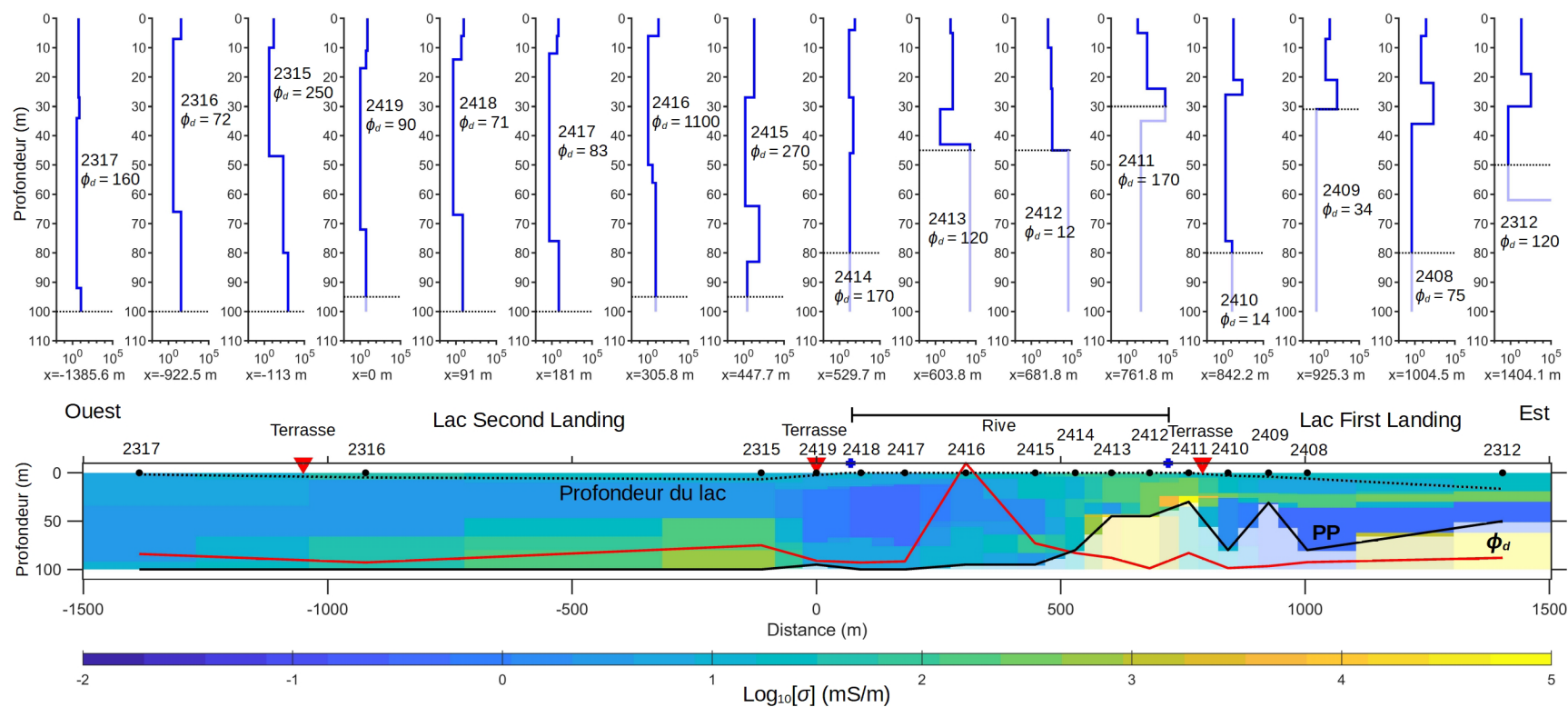


Figure 13. Section de conductivité d'ouest en est du lac Second Landing au lac First Landing. Modèles 1D à quatre couches interpolés horizontalement. Exagération de l'échelle verticale 2:1.

ANNEXE A

Pour un levé électromagnétique dans le domaine temporel, on mesure l'intensité du champ magnétique secondaire dans le temps, généralement consignée sous forme de tension induite dans une bobine réceptrice (p. ex., Geonics, 2011). Pour le récepteur PROTEM-D à 20 fenêtres, les données consistent en une tension mesurée sur 20 fenêtres de temps à espacement logarithmique pour un nombre donné d'enregistrements à différentes fréquences de base. Les temps et les durées de désactivation de l'émetteur ainsi que les durées des fenêtres diffèrent d'une fréquence de base à l'autre. Les enregistrements de plusieurs fréquences de base peuvent être combinés en une courbe de décroissance composite pour augmenter la largeur de bande du récepteur.

Il est possible d'inverser les données pour obtenir la conductivité électrique en minimisant l'erreur de prévision des moindres carrés selon les contraintes du modèle, comme le décrivent les fonctions objectives des données et du modèle. La fonction objective des données est exprimée comme suit :

$$\psi_d = |\phi_d - 1| \quad \text{où} \quad \phi_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{d_i - f_i(m)}{e_i} \right]^2$$

où d_i est la tension du récepteur pour le canal i , $f_i(m)$ est la tension simulée en tant que fonction du modèle m , e_i est l'écart-type de la i^{e} donnée, et N est le nombre de données ($N = 20$ pour un seul sondage avec le PROTEM à 20 fenêtres). Pour les erreurs de prévision normalement distribuées, ϕ_d prend la forme de la loi de χ^2 réduite avec une valeur prévue de 1. Lorsque ψ_d est réduite à zéro, $\phi_d = 1$ et les erreurs de prévision sont proportionnelles à l'écart-type des données conformément au principe d'écart. Si ψ_d ne peut être réduite à zéro, la valeur de ϕ_d au point de convergence correspond à la somme des erreurs de prévision quadratiques par rapport aux erreurs de données.

La fonction objective du modèle est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \psi_m = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\alpha_j \left[\frac{m_j - m_j^r}{m_j^r} \right]^2 + \beta_j \left[\frac{d}{dz} \frac{\sigma_j}{\sigma_j^r} \right]^2 + b_{min} \left[\frac{\max(0, m^{min} - m_j)}{m_j^r} \right]^2 \right. \\ \left. + b_{max} \left[\frac{\max(0, m_j - m^{max})}{m_j^r} \right]^2 \right) \end{aligned}$$

où m^r est un modèle de référence, m^{min} est un modèle de limite inférieure, m^{max} est un modèle de limite supérieure, et M est le nombre de couches du modèle. Le coefficient de pondération α_j contrôle la régularisation du modèle de référence, et le coefficient de pondération β_j contrôle celle du lissage pour la j^{e} couche. Les coefficients de pondération b_{min} et b_{max} contrôlent les termes barrières pour les limites inférieure et supérieure des modèles m^{min} et m^{max} . Le modèle m consiste

en un ensemble de paires de paramètres de conductivité-épaisseur $m_j = [\sigma_j, L_j]$ ou de paires de paramètres conductivité-épaisseur à transformation logarithmique $m_j = \ln[\sigma_j, L_j]$ où l'épaisseur de la couche inférieure est fixe et infinie. Pour le modèle à transformation logarithmique, les termes de la fonction objective du modèle ne sont *pas* normalisés par le modèle de référence, puisque la transformation logarithmique est sans unité et tient compte de la mise à l'échelle sans normalisation. La transformation logarithmique est utilisée ci-après.

Pour minimiser la fonction objective totale $\psi = \psi_d + \psi_m$, on utilise l'optimisation avec simplexe de Nelder-Mead (Lagarias *et al.*, 1998) avec des contraintes de modèle implicites données par ψ_m . Cette optimisation ne nécessite pas de gradient et est idéale lorsque le problème d'optimisation n'est pas lisse, par exemple pour la résolution simultanée des données d'épaisseur et de conductivité de la couche. La solution prospective $f_i(m)$ de Farquharson et Oldenburg (1993) résout la courbe de décroissance de la tension composite dans une bobine réceptrice horizontale sur un sol en couches 1D, s'il y a permittivité diélectrique et perméabilité magnétique du vide (une constante diélectrique de un et une susceptibilité magnétique de zéro). Le modèle commence généralement avec le demi-espace le mieux adapté ou une représentation en couches du modèle L^1 obtenue à partir de EM1DTM (Farquharson et Oldenburg, 1993). Comme les coefficients de pondération par défaut pour le lissage et le modèle de référence sont de zéro, l'inversion est (presque) sans contraintes. Pour que la conductivité électrique et l'épaisseur demeurent positives, la limite inférieure par défaut est fixée selon $\sigma_{min} = 0,01$ mS/m, $L_{min} = 1,0$ m et $b_{min} = 10^4$. Pour les modèles ne comportant que quelques couches, l'inversion sans contraintes est seulement surdéterminée, mais les données imparfaites ou redondantes nécessitent parfois l'utilisation de contraintes pour l'obtention d'une solution stable. Dans la pratique, on voit que pour obtenir un modèle stable comportant plus de cinq couches avec les données du PROTEM à 20 fenêtres, il faut absolument appliquer des contraintes importantes. De plus, les modèles obtenus dépendent fortement des conditions initiales.

Exemple synthétique

Les résultats de l'inversion en couches pour des modèles synthétiques simples à trois couches conductrices et résistives sont illustrés aux figures A1 et A2. Les expériences synthétiques consistent en des sondages en boucle centrale de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ avec 10 fenêtres à une fréquence de base de 285 Hz, suivies de 10 fenêtres à une fréquence de base de 30 Hz, avec un temps de désactivation de $5,1 \mu\text{s}$ dans les deux cas. Les données sont simulées au moyen de la solution prospective de Farquharson et Oldenburg (1993) et contaminées par un bruit aléatoire de 3 %.

Le modèle conducteur se compose d'une couche de 30 m d'épaisseur de 100 mS/m à 30 m de profondeur sur un fond de 1 mS/m. Le modèle résistif se compose quant à lui d'une couche de 30 m d'épaisseur de 0,1 mS/m à 30 m de profondeur sur un fond de 10 mS/m. Dans les deux cas, le modèle de départ en est un homogène de 10 mS/m. Comme prévu, le modèle obtenu est meilleur pour la couche conductrice. Les résultats synthétiques montrent clairement à quel point il est difficile de résoudre les couches résistives avec les sondages TEM. Les deux cas sont très sensibles à la conductivité initiale et moins sensibles à l'épaisseur initiale du modèle (non illustrée).

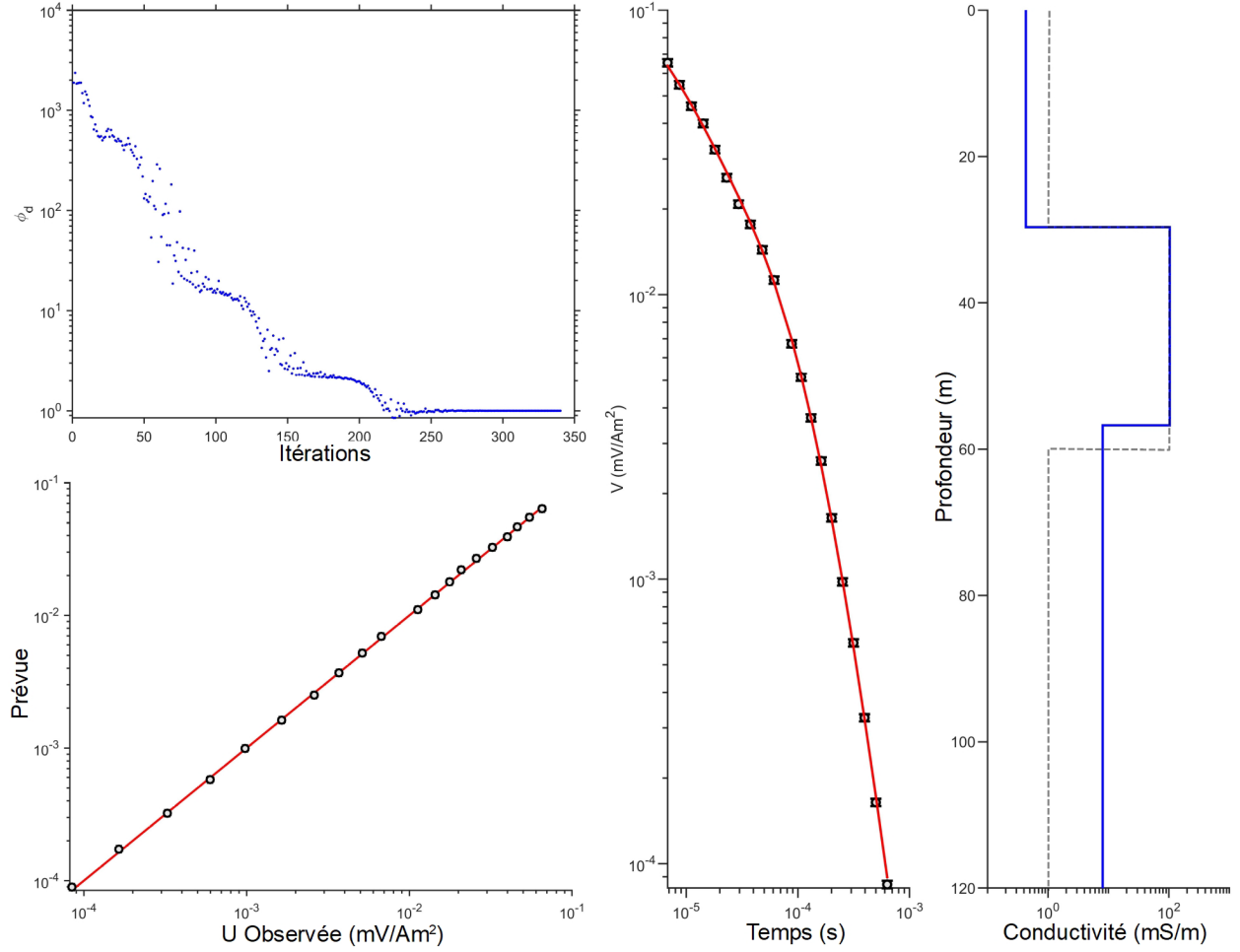


Figure A1. Résultats synthétiques d'inversion pour une couche conductrice (ligne grise pointillée) montrant la courbe de convergence pour ϕ_d , la tension prévue par rapport à celle observée (synthétique), la courbe de décroissance prévue et observée (synthétique) ainsi que le modèle de conductivité électrique obtenu par inversion. Les données sont ajustées selon $\phi_d = 1$ avec une erreur moyenne quadratique (EMQ) de 3 %, équivalente au bruit aléatoire ajouté aux données synthétiques.

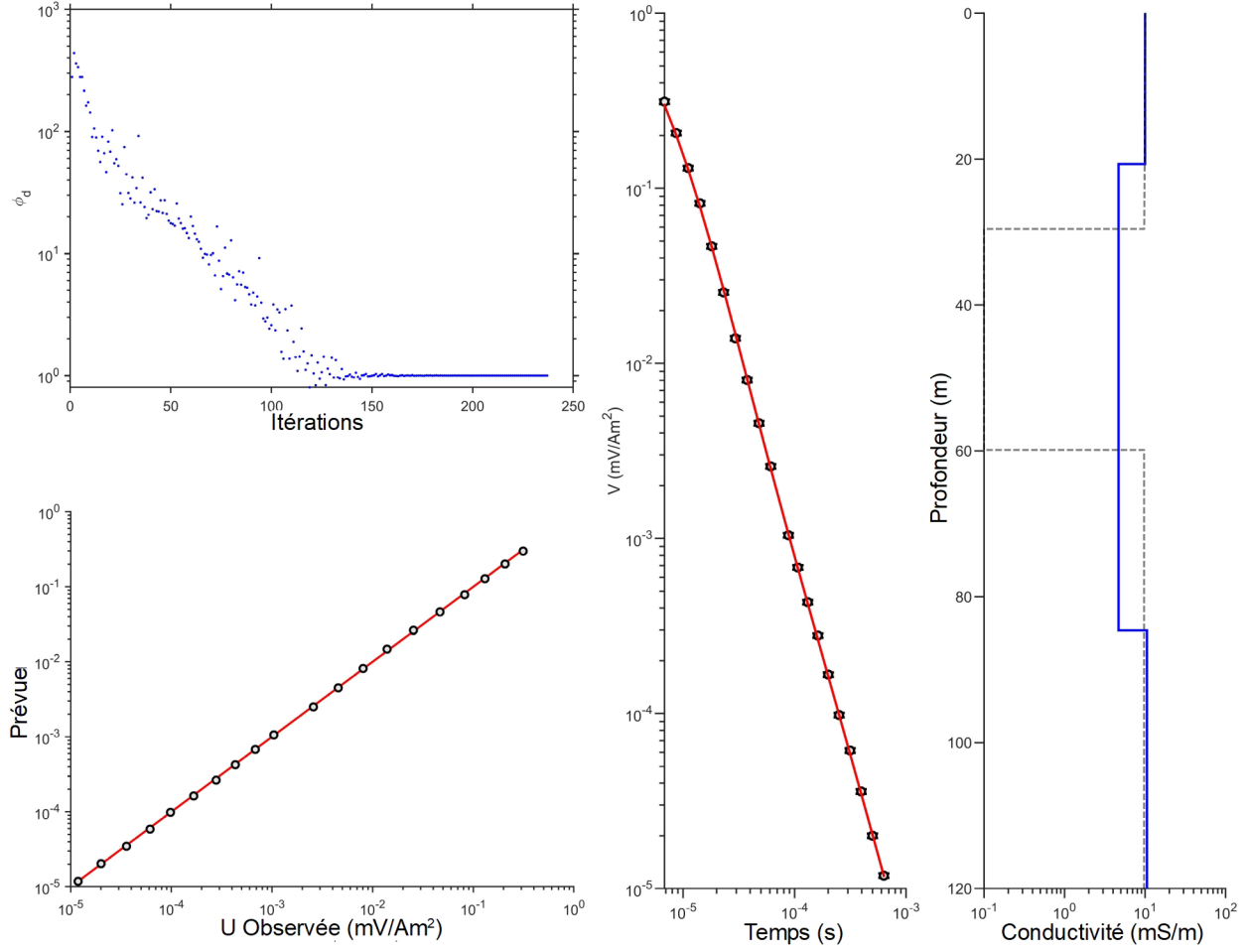


Figure A2. Résultats synthétiques d'inversion pour une couche résistive (ligne grise pointillée) montrant la courbe de convergence pour ϕ_d , la tension prévue par rapport à celle observée (synthétique), la courbe de décroissance prévue et observée (synthétique) ainsi que le modèle de conductivité électrique obtenu par inversion. Les données sont ajustées selon $\phi_d = 1$ avec une erreur moyenne quadratique (EMQ) de 3 %, équivalente au bruit aléatoire ajouté aux données synthétiques.