

Caractérisation préliminaire de la résistivité électrique de l'argile sensible à Brownsburg, Québec

Karine Bélanger¹, Ariane Locat², Richard Fortier²
Denis Demers¹, Majid El Baroudi² et Andrée-Anne Fortin-Rhéaume¹
1 - Ministère des Transports, Québec, Québec, Canada
2 - Université Laval, Québec, Québec, Canada



Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud

ABSTRACT

The *ruisseau des Vases* valley in the vicinity of Brownsburg, Quebec is composed of sensitive clay deposits. Its banks are affected by numerous large landslide scars. In collaboration with Laval University, the Ministère des Transports du Québec recently undertook a detailed investigation in the area to study the suitability of measuring electrical resistivity of soils to characterize areas prone to large retrogressive landslides. An electrical resistivity tomography was carried out along a survey line of 1.6 km long, perpendicular to the axis of the valley. Six cone penetration tests with pore pressure and electrical resistivity measurements were performed along this survey line. The preliminary results show that leached clay areas can be delineated based on the electrical resistivity measurements. The electrical resistivity tomography is a promising tool for the characterization of areas prone to large landslides.

RÉSUMÉ

La vallée du ruisseau des Vases dans la région de Brownsburg au Québec est constituée d'argile sensible et ses berges sont parsemées de nombreuses grandes cicatrices de glissements de terrain. De concert avec l'Université Laval, le Ministère des Transports du Québec a entrepris récemment une investigation détaillée dans cette région afin d'étudier la possibilité d'utiliser la mesure de la résistivité électrique des sols pour caractériser les zones exposées aux glissements de terrain fortement rétrogressifs. Une tomographie de résistivité électrique a été effectuée sur une longueur de 1,6 km, le long d'une ligne de levé transversale à la vallée. Six essais de pénétration au piézocône électrique, incluant la mesure de la résistivité électrique, ont été réalisés le long de cette ligne. Les résultats préliminaires montrent que les mesures de résistivité électrique permettent d'identifier les zones d'argile lessivée. La tomographie de résistivité électrique est une méthode prometteuse pour caractériser les secteurs vulnérables aux grands glissements.

1 INTRODUCTION

La région des basses-terres du Saint-Laurent, qui comprend d'immenses dépôts argileux post-glaciaires de la mer de Champlain, est particulièrement exposée aux glissements de terrain fortement rétrogressifs de types coulées argileuses et étalements latéraux (Locat et al., 2011, Tavenas, 1984). Selon Demers et al. (2013), les sols cohésifs impliqués dans ces grands glissements de terrain ont typiquement des indices de liquidité (I_L) supérieurs à 1,2 et des résistances au cisaillement non drainé à l'état remanié (S_{ur}) inférieures à 1,3 kPa. Sous de telles conditions, les sols argileux présentent une très faible salinité, généralement inférieure à 5 g/L selon Bjerrum (1954), alors que Torrance (1974) suggère même des valeurs de l'ordre de 2 g/L. Selon Lunne et al. (1997), la salinité de l'eau interstitielle est le paramètre qui contrôle de façon plus importante la résistivité électrique des sols argileux, bien que cette propriété soit également influencée par de nombreux autres facteurs, dont la chimie de l'eau interstitielle, la teneur en eau, la granulométrie et la minéralogie (Söderblom, 1970, Rømøen et al., 2010). Les méthodes électriques en géophysique appliquée présentent donc un grand potentiel pour cartographier les secteurs où se trouvent des dépôts d'argile sensible de faible salinité, vulnérables aux grands glissements de terrain. À cet effet, des

méthodes géophysiques ont été testées récemment par des chercheurs scandinaves (Solberg et al., 2008, Lundström et al., 2009, Long et al., 2012, Dahlin et al., 2013, Pfaffhuber et al., 2013). Cependant, mis à part les travaux de Carson (1981) dans la région de Brownsburg au Québec et de Crow et al. (2013) dans la région d'Ottawa en Ontario, ces méthodes ont été peu essayées sur les argiles de l'est du Canada.

Dans le cadre de son mandat de cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain (Potvin et al. 2013), le Ministère des Transports du Québec (MTQ) a entrepris voilà quelques années la caractérisation du bassin du ruisseau des Vases, près de Brownsburg-Chatham, situé à environ 45 km au nord-ouest de la ville de Montréal (Figure 1). Fortin-Rhéaume (2013) a émis l'hypothèse que la distribution géographique des cicatrices des grands glissements de terrain le long de cette rivière était influencée par les variations locales de la salinité des sols argileux. Cette hypothèse semble être confirmée par les zones de faible résistivité électriques cartographiées par Carson (1981) dans le même secteur. Afin d'explorer le potentiel d'utilisation des méthodes mesurant la résistivité électrique pour caractériser les argiles sensibles du Québec, une étude détaillée a été entreprise en 2014 conjointement par le MTQ et l'Université Laval. Une investigation géophysique et géotechnique a été réalisée

à l'automne 2014 le long de la Montée Clark, qui recoupe transversalement la vallée du ruisseau des Vases, dans un secteur où se trouvent de nombreuses cicatrices de grands glissements de terrain (Figure 2).

L'objectif du présent article est de présenter les résultats préliminaires d'un profilage de résistivité électrique et de six essais de pénétration au piézocône électrique (RCPTU) réalisés à Brownsburg.

2 DESCRIPTION DU SITE

Le secteur à l'étude est situé dans la partie amont de la vallée du ruisseau des Vases, où elle devient étroite, bordée au nord par les massifs rocheux du bouclier canadien et au sud par une remontée du socle rocheux calcaire recouvert d'une mince couche de till. Le centre de cette vallée pré-glaciaire est enfoui sous un épais dépôt de sédiments argileux de la mer de Champlain dont l'épaisseur peut atteindre près d'une cinquantaine de mètres (Fortin-Rhéaume, 2013). Selon Carson (1981), une couche de sédiments fluvio-glaciaires mesurant jusqu'à 35 m d'épaisseur est présente du côté sud du ruisseau, entre les sols argileux et le till sous-jacent. En sillonnant plus ou moins au centre de cette vallée, le ruisseau des Vases a érodé progressivement les sols

argileux pour former des berges dont les hauteurs typiques sont comprises entre 10 et 15 m aux endroits où sont observées les cicatrices de grands glissements de terrain. Le secteur investigué est à vocation agricole et il est peu habité.

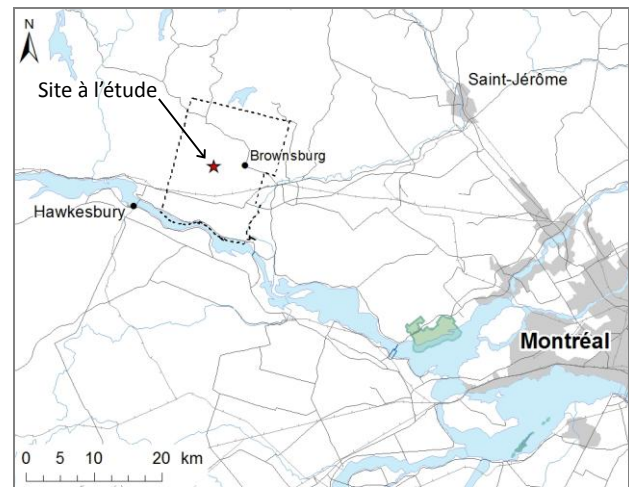


Figure 1. Carte de localisation du site à l'étude.

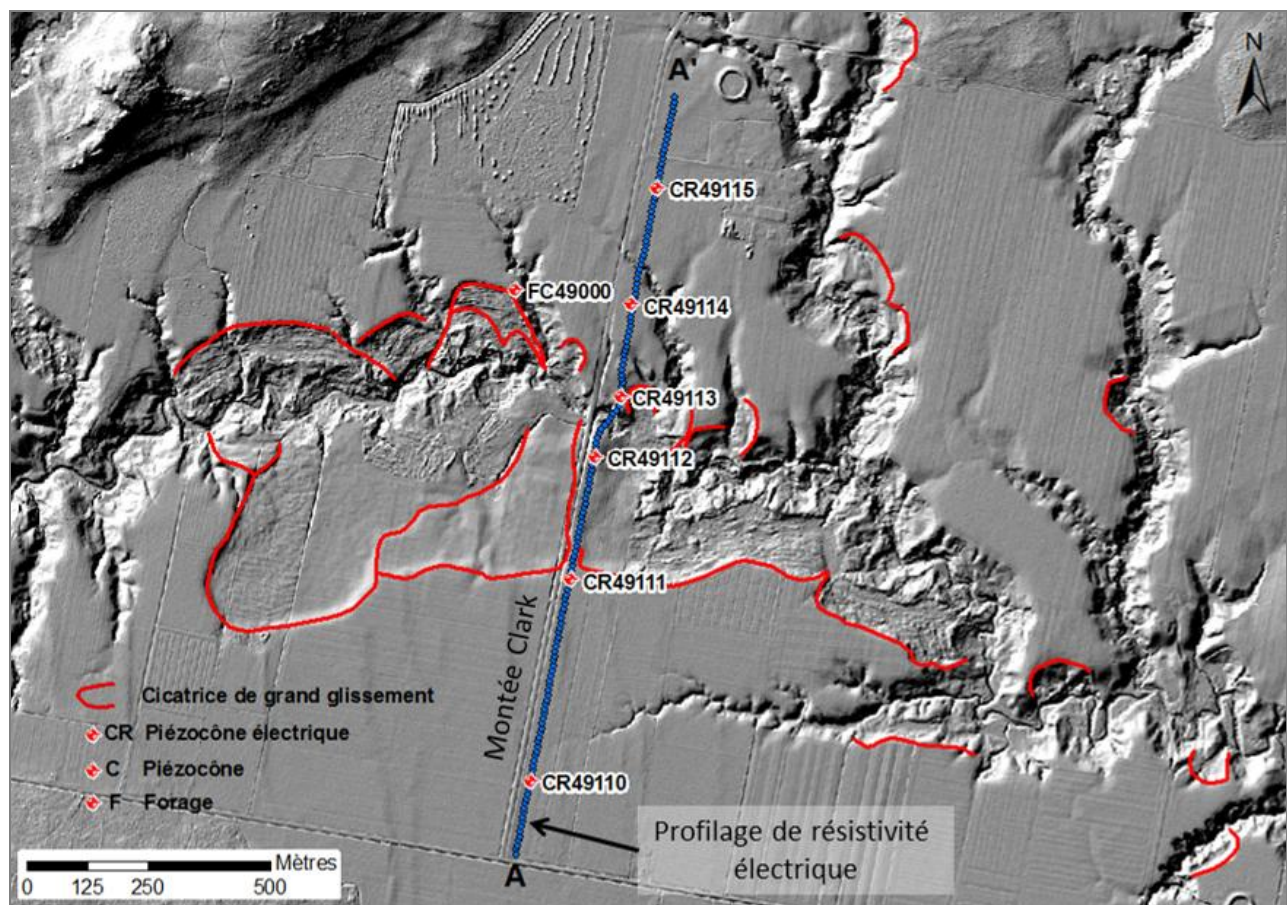


Figure 2. Carte de localisation détaillée du secteur à l'étude et modèle ombragé du terrain provenant d'un levé LiDAR aéroporté effectué en 2010 (Source : Gouvernement du Québec, 2010).

3 CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Un aperçu des propriétés géotechniques des dépôts d'argile de Brownsburg est fourni dans Fortin-Rhéaume (2013). Le forage F49000, réalisé au nord du ruisseau des Vases, a permis de caractériser le dépôt argileux jusqu'à une profondeur de 24,6 m (Figures 2 et 3). Sous une croûte argileuse épaisse d'environ 1,7 m, le sol est composé d'argile grise et alterne par endroit avec des bandes d'argile rosée. Des taches ou des bandes noirâtres sont également observées occasionnellement dans le profil. L'argile est de consistance molle à ferme. Sa teneur en eau naturelle ($w_{naturelle}$) est d'environ 90% sur les 10 m supérieurs et elle diminue graduellement jusqu'à 62% vers 25 m de profondeur. Les limites de plasticité (w_p) et de liquidité (w_L) sont comprises entre 24 et 30% et entre 50 et 65% respectivement. L'indice de liquidité (I_L) se situe entre 1,8 et 2,5 sur les 10 m supérieurs et diminue presque linéairement pour atteindre 1,1 vers 25 m de profondeur. Entre 3,5 et 26,4 m de

profondeur, la résistance au cisaillement intacte (S_u), mesurée au cône suédois, varie entre 12 et 53 kPa et la résistance au cisaillement à l'état remaniée (S_{ur}) se situe entre 0,37 et 2,76 kPa. Le phénomène de thixotropie pourrait avoir affecté la résistance au cisaillement à l'état remanié de certains échantillons. En effet, les données ne suivent pas toutes la tendance de la relation I_L - S_{ur} de Leroueil et al. (1983).

Selon l'essai de pénétration au piézocône C49000, réalisé à proximité du forage F49000, la base de ce dépôt argileux se trouve à une profondeur de 37,5 m. Le refus à la pénétration s'est produit à une profondeur de 40,95 m, après avoir traversé une couche de sols argileux hétérogènes et stratifiés.

Des mesures de salinité ont été réalisées par chromatographie ionique sur l'eau interstitielle des échantillons du forage F49000. Les résultats obtenus montrent que la salinité augmente avec la profondeur, passant de 0,2 g/L à 3 m de profondeur à 5 g/L à 24,4 m (Fortin-Rhéaume, 2013).

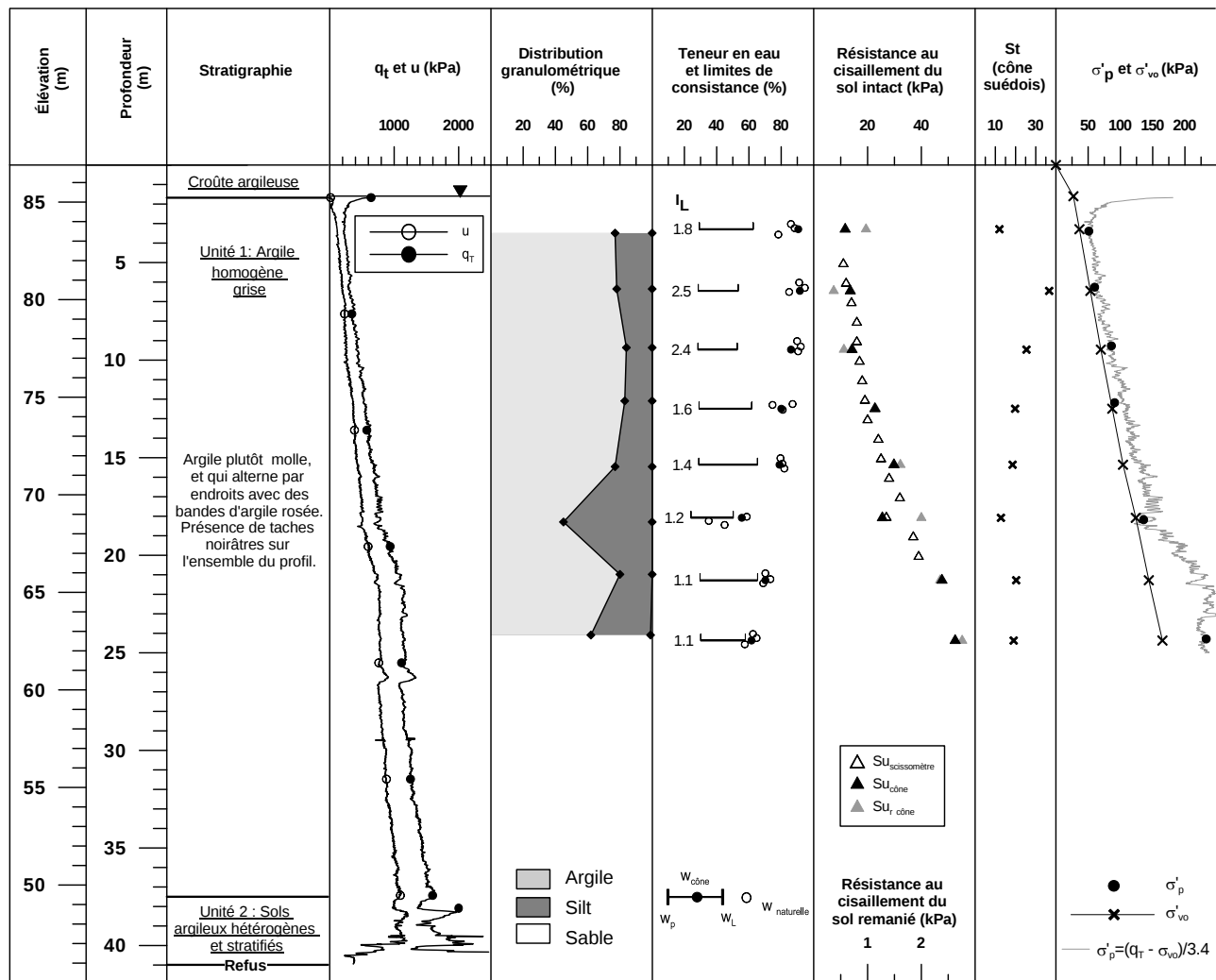


Figure 3. Profil des propriétés géotechniques du forage F49000 et de l'essai de pénétration au piézocône C49000 (Tiré de Fortin-Rhéaume, 2013).

Carson (1981) a étudié l'influence de la salinité sur la résistivité électrique des argiles marines dans la région de Lachute. Il a réalisé des sondages de résistivité électrique selon la configuration de Wenner. Les résultats de ces sondages de résistivité électrique ont été comparés à des mesures de salinité effectuées en laboratoire afin d'établir une relation entre la salinité de l'eau interstitielle et la résistivité électrique du sol. Sur les 47 sondages réalisés, 9 se situent à proximité de la Montée Clark. La salinité moyenne sur 18 m d'épaisseur de sol, déduite de ces sondages de résistivité électrique, est inférieure à 1 g/L au sud du ruisseau des Vases. La salinité moyenne déduite au nord du ruisseau des Vases est de 3 g/L à proximité du cours d'eau, de 5 g/L à environ 300 m de distance et est inférieure à 1 g/L à 700 m du ruisseau.

4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Tomographie de résistivité électrique

Un profilage de résistivité électrique a été réalisé à l'automne 2014 le long d'une ligne de levé perpendiculaire à l'axe de la vallée sur une longueur de 1,6 km dans un champ agricole à l'est de la Montée Clark (Figure 2). Un émetteur Tx II et un receveur GRx8-32 fabriqués par Instrumentation GDD inc. ont été utilisés pour émettre le courant dans le sol et mesurer les potentiels induits, selon la configuration dite du dipôle-dipôle avec 8 dipôles de potentiel. Un espacement de 20 m entre les électrodes et un déplacement de la configuration à tous les 10 m ont été utilisés. Un cycle d'injection du courant de 2 secondes (2s +, 2s off, 2s -, 2s off) a été employé pour éviter la polarisation des électrodes.

L'inversion du profilage de résistivité électrique a été réalisée à l'aide du logiciel RES2DINV selon la méthode des moindres carrés (Norm-L1) (Geotomo Software, 2013). Les électrodes ont été localisées à l'aide d'un receveur GPS, alors que leur élévation a été obtenue à l'aide d'un levé LiDAR aéroporté (Figure 2). Les élévations des électrodes ont été considérées lors de l'inversion.

4.2 Essai de pénétration au piézocône électrique

Six essais de pénétration au piézocône avec mesure de la résistivité électrique ont également été réalisés le long de la ligne de levé à l'automne 2014 (Figure 2). Le pénétromètre utilisé est fabriqué par la compagnie Vertek. Il fait un diamètre de 36 mm et la capacité maximale de la résistance à la pointe est de 5 tonnes. Il a été foncé dans le sol à une vitesse de 1 cm/s. La résistance à la pointe (q_1) et la pression interstitielle générée à la base de la pointe (u_2) ont été mesurées lors des essais. Un module de résistivité électrique composé de quatre électrodes complète le piézocône. Le courant électrique est injecté dans le sol entre les deux électrodes extérieures, alors que le potentiel induit est mesuré entre les deux électrodes centrales. Le courant électrique est régulièrement inversé pour éviter la polarisation des électrodes. Une correction est apportée à la profondeur des mesures de la résistivité électrique étant donné que c'est la profondeur de la pointe qui est enregistrée et non pas la profondeur du centre du module de résistivité, lequel se trouve au-dessus de la pointe.

4.3 Caractérisation géotechnique

Des échantillons ont été prélevés par forage à l'automne 2014 et à l'hiver 2015 le long de la ligne de levé aux sites CR49111, CR49112, CR49114 et CR49115 (Figure 2). Des travaux de laboratoire sont présentement en cours afin de mesurer les propriétés géotechniques, géophysiques et chimiques des échantillons récoltés dans ces quatre forages. Les résultats de ces travaux seront présentés ultérieurement.

5 RÉSULTATS

5.1 Tomographie de résistivité électrique

Le résultat de l'inversion des données de résistivité électrique est présenté à la figure 4. La profondeur d'investigation du profilage de résistivité électrique atteint près de 50 m.

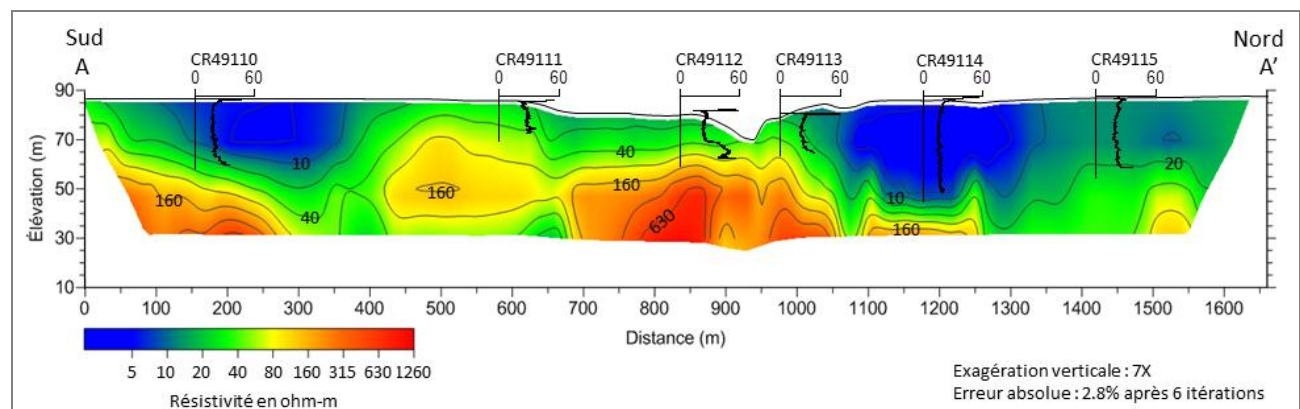


Figure 4. Modèle de résistivité électrique situé le long de la Montée Clark. Les valeurs de résistivité électrique, exprimées en ohm-m, des six essais de pénétration au piézocône sont superposées sur le modèle.

Le modèle de résistivité électrique obtenu de l'inversion (Figure 4) est fiable jusqu'à 25 m de profondeur, selon le modèle de la sensibilité relative réalisé, mais non présenté dans cet article. À plus grande profondeur, la sensibilité du modèle est plus faible et les données de résistivité présentées doivent être interprétées avec précaution. L'erreur absolue entre les valeurs de résistivité électrique observées et calculées est de 2,8%, après six itérations.

Les plus faibles valeurs de résistivité électrique, inférieures à 10 ohm-m, sont identifiées par les teintes bleues sur le modèle (Figure 4). Deux zones de faible résistivité sont présentes entre la surface et 25 à 35 m de profondeur dans le modèle. La première zone se situe à l'extrémité sud du levé et la seconde au nord du ruisseau des Vases. La valeur maximale de résistivité est de 1000 ohm-m et elle est représentée en rouge au centre du profil. Les valeurs de résistivité électrique comprises entre 10 ohm-m et moins de 600 ohm-m sont représentées par les teintes vertes, jaunes et orangées.

5.2 Essai de pénétration au piézocône électrique

Six essais de pénétration au piézocône électrique, CR49110 à CR49115, ont été réalisés le long de la ligne de levé géophysique (Figure 2). La résistivité électrique mesurée lors de ces essais est présentée sous la forme de diagraphies à la figure 4 qui sont superposées au modèle de résistivité électrique. Les résultats de l'essai CR49114 sont présentés à titre d'exemple à la figure 5.

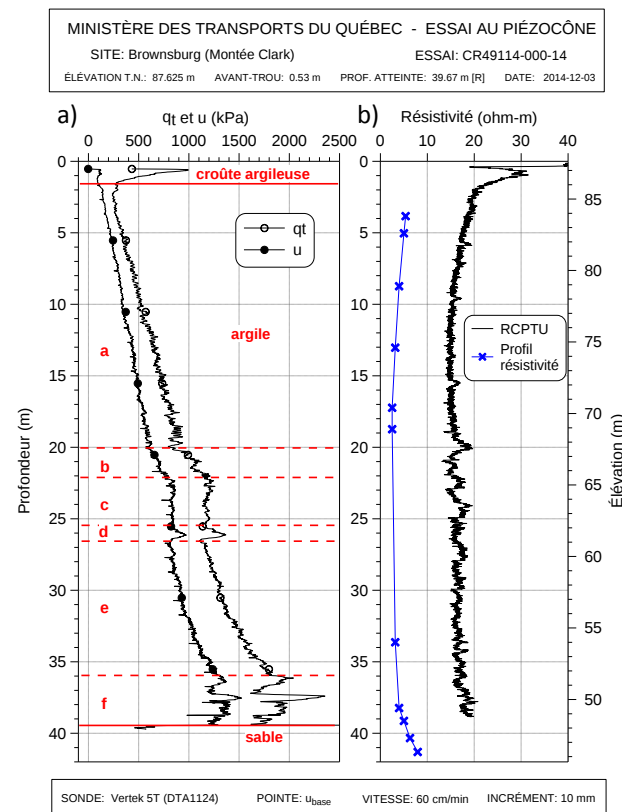


Figure 5. Profil du piézocône à résistivité CR49114.

Les diagraphies de la résistance à la pointe corrigée (q_t) et de la pression interstitielle générée à la base de la pointe (u) apparaissent à la figure 5a. L'interprétation de ces diagraphies est également fournie et elle est semblable à celle de Fortin-Rhéaume (2013) pour l'essai C49000 (Figure 2). La stratigraphie est composée d'une croûte argileuse superficielle de 1,7 m d'épaisseur et d'une couche d'argile jusqu'à 39,2 m de profondeur. Cette couche est divisée en six sous-unités (a à f), lesquelles ont été identifiées par différents taux de variation de la résistance à la pointe. Le substratum ferme, composé de sable, a été traversé sur 0,5 m d'épaisseur avant le refus à la pénétration à 39,67 m de profondeur.

La diagraphie de résistivité électrique mesurée lors de l'essai CR49114 et celle inférée du modèle de résistivité électrique à la position de l'essai CR49114 (Figure 4) apparaissent à la figure 5b. Les valeurs de résistivité mesurées lors de l'essai CR49114 sont supérieures d'environ 12 à 14 ohm-m par rapport à celles inférées sur le modèle. Cependant, les tendances à la diminution et à l'augmentation de la résistivité en profondeur sont semblables pour ces deux diagraphies. La différence entre les mesures de résistivité provenant des RCPTUs et du modèle de résistivité électrique sera étudiée plus en détail ultérieurement.

Les diagraphies de résistivité électrique des six essais de pénétration au piézocône électrique sont présentées à la figure 6.

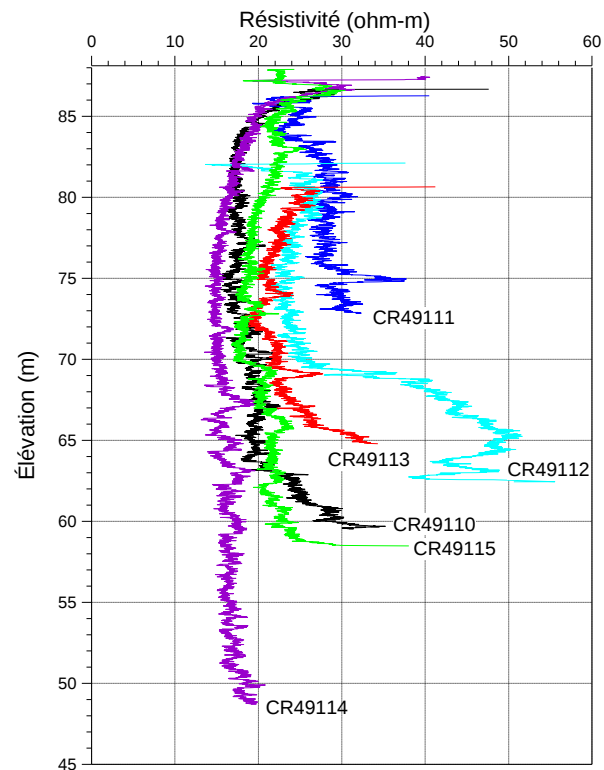


Figure 6. Profils de la résistivité électrique mesurée par piézocône pour les sondages CR49110 à CR49115, en fonction de l'élévation.

L'essai de pénétration au piézocône électrique CR49114 présente les résistivités électriques les plus faibles, de l'ordre de 15 ohm-m, alors que les résistivités maximales ont été enregistrées lors de l'essai CR49112 avec des valeurs près de 50 ohm-m. De façon générale, la résistivité dans l'argile sous la croûte argileuse se situe entre 15 et 30 ohm-m.

La profondeur et l'élévation par rapport au niveau moyen de la mer du refus à la pénétration, ainsi que la stratigraphie inférée des six essais RCPTUs sont présentées au tableau 1. L'élévation du refus varie d'un essai à l'autre. Une remontée du substratum est identifiée au centre du levé, soit vis-à-vis les sondages CR49111 à CR49113.

Tableau 1. Résumé des sondages au piézocône

Sondage	Élévation du refus (m)	Profondeur du refus (m)	Unités stratigraphique
CR49110	58,8	28,5	croûte, argile (a à f), substratum ferme
CR49111	72,0	14,1	croûte, argile (a et b), substratum ferme
CR49112	61,8	20,9	croûte, argile (a à f), substratum ferme
CR49113	64,0	17,0	croûte, argile (a à c), substratum ferme
CR49114	47,9	39,7	croûte, argile (a à f), substratum ferme
CR49115	57,7	29,9	croûte, argile (a à f), substratum ferme

6 DISCUSSION

De nombreuses études ont déjà été réalisées sur la corrélation entre la résistivité électrique et la sensibilité de l'argile, notamment en Norvège et en Suède (Berger 1980, Solberg et al., 2008, Lundström et al., 2009, Rømoen et al., 2010, Long et al., 2012). La résistivité de l'argile marine saline mesurée lors de ces études est inférieure ou égale à 10 ohm-m, à l'exception de Berger (1980) qui suggère 20 Ω m comme limite, laquelle est définie par sondage électrique. Les valeurs de résistivité de l'argile lessivée et potentiellement sensible au remaniement sont généralement comprises entre 10 et 80 à 90 ohm-m dans ces études. Ces valeurs peuvent également correspondre à de l'argile lessivée, mais non sensible, à du silt ou à du till à grains fins. Des valeurs supérieures à 80 ohm-m sont typiques de la croûte argileuse sèche, des matériaux grossiers (sable, gravier) ou du roc.

L'interprétation préliminaire des résultats du profilage de résistivité électrique et des six essais de pénétration au piézocône électrique est présentée sous la forme d'une coupe stratigraphique interprétative à la figure 7. Le modèle de résistivité électrique est présenté en arrière-plan à cette coupe. La valeur limite de 10 ohm-m proposée par Solberg et al. (2008) a été utilisée pour délimiter le contact entre l'argile saline et l'argile lessivée (tirets blancs sur la figure 7). La limite entre l'argile et le substratum est déterminée à partir des refus à la pénétration des six essais RCPTUs, représentés par des x sur la figure 7, et elle est interpolée entre les essais en

se fiant au modèle, même s'il n'y a pas de valeur unique qui permet de délimiter le substratum de l'argile. En effet, la valeur de résistivité qui délimite l'argile et le substratum dans la partie centrale du levé est d'environ 80 ohm-m, alors qu'elle est de l'ordre de 20 ohm-m aux extrémités sud et nord.

Selon Carson (1981), la salinité au sud du ruisseau des Vases serait inférieure à 1 g/L, alors qu'elle serait variable au nord du ruisseau, avec des valeurs comprises entre 5 g/L à une faible distance du ruisseau des Vases et moins de 1 g/L, complètement au nord de la ligne de levé. La coupe stratigraphique et le modèle de résistivité électrique de la figure 7 suggèrent des variations spatiales de salinité inférée de la résistivité semblables à celles observées par Carson. Cependant, en plus du bassin d'argile saline situé au nord du ruisseau des Vases, un second bassin d'argile saline se trouverait à l'extrémité sud du modèle de résistivité électrique. Les valeurs élevées de résistivité électrique au centre du profil seraient expliquées par la présence de matériaux sableux et graveleux (Carson, 1981). De plus, les valeurs élevées en profondeur à l'extrémité sud s'expliqueraient par la proximité du till, visible en surface à environ 300 m vers le sud, dans l'alignement avec la ligne de levé.

La zone d'argile lessivée située à proximité du ruisseau des Vases et montrée sur la coupe de la figure 7 semble cohérente avec les observations de terrain. En effet, la cicatrice d'un ancien grand glissement de terrain est présente (Figures 2 et 7). Pour qu'un glissement de terrain de cette ampleur se produise, l'argile doit être sensible (Tavenas, 1984), ce qui correspond à une argile lessivée d'une résistivité supérieure à 10 ohm-m. Il est toutefois possible que d'autres zones identifiées comme étant de l'argile lessivée n'en soient pas, puisque les valeurs de résistivité électrique du till argileux et du silt sont similaires à l'argile lessivée.

Les valeurs de résistivité mesurées lors des essais de pénétration au piézocône électrique sont généralement supérieures à celles du modèle de résistivité électrique au droit de ces essais. Par exemple, cette différence est de l'ordre de 10 à 15 ohm-m pour l'essai CR49114 (Figure 5). Cependant, certaines valeurs de résistivité électrique mesurées lors des essais RCPTUs sont légèrement inférieures à celles du modèle de résistivité électrique. Elles sont principalement localisées à proximité des refus à la pénétration, où les valeurs de résistivité électrique du substratum sont plus élevées, tel qu'au centre du profil. Étant donné que le contact au substratum n'a pas été considéré pour contraindre le modèle de résistivité électrique lors de l'inversion, ce contact stratigraphique est caractérisé par une augmentation progressive de la résistivité plutôt qu'une augmentation franche.

D'après les propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons du forage F49000 (Figure 3), l'argile est sensible entre 4 et 14 m de profondeur, puisque l'indice de liquidité est supérieure à 1,2 et que la résistance au cisaillement à l'état remanié est inférieure ou égale à 1,3 kPa, tel que suggéré par Demers et al. (2013). En première approximation, ces valeurs sont probablement aussi représentatives du site de l'essai CR49114, puisqu'il se trouve à proximité du forage F49000 et à une distance

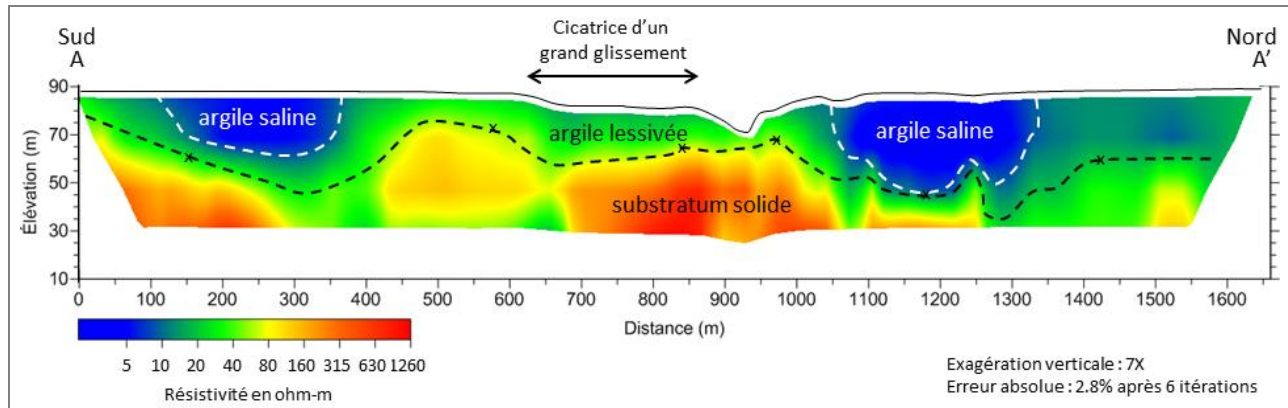


Figure 7. Interprétation préliminaire du modèle de résistivité électrique situé le long de la Montée Clark.

similaire du ruisseau des Vases (Figure 2). Les valeurs de résistivité électrique associées à cette zone sensible sur le profil du piézocône présenté à la figure 5 sont de 20 ohm-m à 2 m de profondeur et ces valeurs diminuent jusqu'à atteindre 15 ohm-m à 14 m de profondeur. À des profondeurs plus grandes, les valeurs se situent de façon générale entre 15 et 17 ohm-m. Pour les valeurs de résistivité électrique du modèle (Figure 4), la tendance est similaire à celle de l'essai CR49114, mais avec de plus faibles valeurs de résistivité électrique. Ces valeurs sont de 5,4 ohm-m vers 4 m de profondeur (Figure 5b) et elles diminuent graduellement jusqu'à 17 m de profondeur pour atteindre une résistivité de 2,5 ohm-m. Elles augmentent ensuite très graduellement à environ 3,2 ohm-m jusqu'à 33,5 m de profondeur. La transition entre les valeurs de résistivité électrique de l'argile sensible et non sensible est subtile et difficilement identifiable, autant sur l'essai au piézocône qu'à partir du modèle de résistivité électrique (Figure 5b). Il semble toutefois que la profondeur à laquelle la résistivité électrique minimale est atteinte représente la limite entre l'argile lessivée et saline, basé uniquement sur les résultats de l'essai CR49114 (Figure 5b). Ainsi, la valeur limite de résistivité électrique entre l'argile saline et l'argile lessivée pour le site de Brownsburg serait de 15 ohm-m d'après l'essai de pénétration au piézocône et de 2,5 ohm-m d'après le modèle de résistivité électrique.

Basé sur les résultats de l'essai CR49114 et sur les propriétés géotechniques de l'argile au site F49000, la couche d'argile saline délimitée à la Figure 7, selon une valeur limite de 10 ohm-m sur le modèle de résistivité électrique, est possiblement trop épaisse. Une valeur limite de l'ordre de 2,5 ohm-m sur le modèle de résistivité électrique pourrait être plus représentative de l'argile saline sur ce site. De la même façon, si une valeur limite de 15 ohm-m pour l'essai de pénétration au piézocône est utilisée pour délimiter l'argile saline de l'argile lessivée, plutôt que la valeur de 20 ohm-m suggérée par Berger (1980), seul l'essai CR49114 est caractérisé par des valeurs de résistivité électrique aussi faibles (Figure 6). Ces résultats suggèrent que la couche d'argile située au sud du ruisseau des Vases et traversée par l'essai CR49110 est possiblement composée d'argile lessivée. Cela corroborerait les résultats de Carson (1981). Un

forage avec échantillonnage permettrait de valider cette hypothèse.

Les essais de laboratoire présentement réalisés aux sites CR49111, CR49112, CR49114 et CR49115 permettront de délimiter de façon plus détaillée les zones d'argile lessivée et sensible. De plus, des mesures de microvibrations seront effectuées au droit du profil ce qui permettra de délimiter le contact avec le substratum de façon plus certaine et améliorera l'interprétation présentée à la figure 7.

7 CONCLUSION

Le profilage de résistivité électrique et les essais de pénétration au piézocône électrique sont des méthodes complémentaires utilisées en géophysique et en géotechnique. Les essais de pénétration permettent d'obtenir des mesures fines et détaillées de la résistivité électrique des couches traversées pour identifier les couches d'argile lessivées et potentiellement sensibles. Toutefois, ces essais demeurent ponctuels et ne permettent pas d'obtenir une vision globale de la résistivité électrique dans un secteur donné, contrairement au profilage de résistivité électrique qui fournit une vue en coupe de la variabilité spatiale de la résistivité du massif argileux investigué.

Selon les résultats obtenus dans le présent projet, le profilage de résistivité électrique est une méthode géophysique intéressante pour des fins de planification et d'optimisation d'une campagne d'échantillonnage lors de la caractérisation des propriétés géotechniques d'un massif argileux. Il est cependant hasardeux de se baser uniquement sur un profilage pour délimiter les zones d'argile potentiellement lessivée car différents matériaux géologiques peuvent avoir les mêmes valeurs de résistivité, tel que noté lors des nombreuses études scandinaves (Solberg et al., 2008, Lundström et al., 2009, Long et al., 2012, Dahlin et al., 2013, Pfaffhuber et al., 2013).

La valeur limite de résistivité électrique de 10 ohm-m, fréquemment utilisée pour délimiter l'argile saline de l'argile lessivée, semble trop élevée pour le site de Brownsburg. Les quatre forages avec échantillonnage

réalisés à l'hiver 2015 permettront de raffiner l'interprétation du profilage de résistivité électrique en caractérisant la sensibilité au remaniement, la salinité et la chimie des argiles échantillonnées.

La réalisation du profilage de résistivité électrique combiné à des essais de pénétration au piézocône électrique et à de l'échantillonnage permettra d'obtenir un portrait global du secteur. Des recommandations pourront être formulées pour mettre en pratique l'approche géophysique-géotechnique présentée dans cet article pour la cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements fortement rétrogressifs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Martin D'Anjou pour sa participation à la réalisation du profilage de résistivité électrique et Raphaël Vincent pour la réalisation des forages et sondages. Le soutien financier du Conseil de recherche en sciences et génie du Canada se doit aussi d'être souligné, ainsi que le Ministère des Transports du Québec qui a autorisé la publication de ces données. Un remerciement spécial est offert à Tim Clark pour avoir autorisé la réalisation des travaux sur sa propriété.

REFERENCES

- Berger, B., 1980. *Rapport om vertikale elektriske sonderinger i Verdal*. Norwegian Institute of Technology, Trondheim.
- Bjerrum, L., 1954. Geotechnical properties of Norwegian marine clays, *Geotechnique*, 4: 49-69.
- Carson, M.A., 1981. Influence of porefluid salinity on instability of sensitive marine clays: A new approach to an old problem, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6(6): 499 - 515.
- Crow, H.L., Hunter, J.A., Pugin, A.J.M., Pullan, S.E., Alpay, S., and Hinton, M., 2013. Empirical geophysical/geotechnical relationships in the Champlain sea sediments of eastern Ontario, *In Landslides in sensitive clays*. Edited by L'Heureux, J.-S. et al., Springer, pp 253-264.
- Dahlin, T., Schälin, D., and Tornborg, J., 2013. Mapping of quick clay by ERT and CPT-R in the Göta Älv river valley, *In Landslides in sensitive clays*. Edited by L'Heureux, J.-S. et al., Springer, pp 217-228.
- Demers, D., Robitaille, D., Locat, P., and Potvin, J., 2013. Inventory of large landslides in sensitive clay in the province of Québec, Canada: Preliminary analysis, *In Landslides in sensitive clays*. Edited by L'Heureux, J.-S. et al., Springer, pp 77-90.
- Fortin-Rhéaume, A.-A., 2013. Étude de l'étalement latéral de 1988 et des autres glissements de terrain le long de la vallée à Brownsburg-Chatham, Québec. Mémoire de maîtrise ès sciences, génie civil, Université Laval.
- Geotomo Software, 2013. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, on land, aquatic and cross-borehole surveys, *Instruction manual*, Penang, Malaysia, 161 p.
- Leroueil, S., Tavenas, F. et Le Bihan, J.-P., 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, 20: 681-705.
- Locat, A., Leroueil, S., Bernander, S., Demers, D., Jostad, H.P., and Oueh, L., 2011. Progressive failures in eastern Canadian and Scandinavian sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 48: 1696-1712.
- Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J.-S., Solberg, I.-L., Rønning, J.S., Limacher, R., O'Connor, P., Sauvin, G., Rømøen, M., and Lecompte, I., 2012. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 49: 1158-1168.
- Lundström, K., Larsson, R., and Dahlin, T., 2009. Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods, *Landslides*, 6: 1-15.
- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M., 1997. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. E&FN Spon, London, UK, pp 182-194.
- Pfaffhuber, A.A., Bazin, S., Helle, T.E., 2013. An integrated approach to Quick-clay mapping based on resistivity measurements and geotechnical investigations, *In Landslides in sensitive clays*. Edited by L'Heureux, J.-S. et al., Springer, pp 193-204.
- Potvin, J., Thibault, C., Demers, D., and Bilodeau, C., 2013. An overview of the mapping of landslide-prone areas and risk management strategies in the province of Québec, Canada, *In Landslides in sensitive clays*. Edited by L'Heureux, J.-S. et al., Springer, pp 331-342.
- Rømøen, M., Pfaffhuber, A.A., Karlsrud, K. and Helle, T.E., 2010. Resistivity on marine sediments retrieved from RCPTU soundings: a Norwegian case study, *In Proceedings on the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)*. Edited by Robertson, P.K., and Mayne, P.W. Omnipress, Huntington Beach, California. pp 289-296.
- Söderblom, R., 1970. Aspects on some problems of geotechnical chemistry – Part III, *Geologiska Föreningen I Stockholm Förhandlingar*, 92(4): 452-468.
- Solberg, I.-L., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Hansen, L., Rokoengen, K., and Sandven, R., 2008. Resistivity measurements as a tool for outlining quick-clay extent and valley-fill stratigraphy: a feasibility study from Buvika, central Norway, *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 210-225.
- Tavenas, F., 1984. Landslides in Canadian sensitive clays – a state-of-the-art. *In Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, Vol 1, pp 141-153.
- Torrance, J.K., 1974. A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays. *Geotechnique*, 24: 155-173.