



HAL
open science

Induced Polarization for monitoring cut-off walls: a first approach

Carole Kaouane, Lucile Saussaye, Yannick Fargier, Sérgio Palma Lopes

► To cite this version:

Carole Kaouane, Lucile Saussaye, Yannick Fargier, Sérgio Palma Lopes. Induced Polarization for monitoring cut-off walls: a first approach. JNGG 2018 (Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur), Jun 2018, Champ sur Marne, France. hal-04533539

HAL Id: hal-04533539

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04533539>

Submitted on 5 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA POLARISATION PROVOQUÉE POUR LE SUIVI DES ÉCRANS ÉTANCHES : UNE PREMIÈRE APPROCHE

INDUCED POLARIZATION FOR MONITORING CUT-OFF WALLS: A FIRST APPROACH

Carole KAOUANE¹, Lucile SAUSSAYE², Yannick FARGIER³, Sérgio PALMA-LOPES⁴

¹Cerema Normandie-Centre, Rouen, France

²Cerema Normandie-Centre, Blois, France

³IFSTTAR, Bron, France

⁴IFSTTAR GERS/GeoEND, Bouguenais, France

RÉSUMÉ – Un mélange sol-ciment a été mis en œuvre dans une tranchée réalisée sur une digue expérimentale. Sa consolidation est suivie sur 30 jours avec la méthode de Polarisation Provoquée (PP). Les choix réalisés sont décrits compte tenu des contraintes liées à la PP et à l'automatisation du suivi. Les résultats incitent à poursuivre l'étude de la PP comme méthode de suivi in situ des mélanges sol-ciment.

ABSTRACT – We implemented a soil-cement mix into a trench located on an experimental levee, and we monitored the consolidation of the mix over 30 days using time-domain Induced Polarization (IP). We describe our approach and the trade-offs we made considering the constraints imposed by the IP method and the automation of the monitoring. IP could be used in a near future for in situ monitoring of soil-cement mix.

1. Introduction

Les techniques d'amélioration des sols avec des liants hydrauliques tels que le *deep soil mixing* sont écologiquement et économiquement pertinentes. Leur application aux ouvrages hydrauliques en terre est récente et prometteuse. Toutefois, actuellement, aucune méthode non destructive ne permet de réaliser le suivi et d'évaluer la durabilité des ouvrages traités. Il faut donc développer des techniques de contrôle, qui possèdent une résolution suffisante pour détecter correctement la géométrie de l'ouvrage ; et qui permettent de suivre la solidification du matériau traité et de le différencier du matériau naturel en place. En particulier, pouvoir mesurer in situ et de façon non destructive la perméabilité hydraulique serait un développement majeur pour le suivi des ouvrages. Aucune méthode non destructive couramment utilisée en géotechnique n'en est capable.

La Polarisation Provoquée dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel est une méthode qui a connu une avancée considérable ces dernières décennies, entre autres pour accéder aux propriétés de structure du milieu telles que la perméabilité hydraulique et la distribution de la taille des pores (Weller 2015 ; Revil et al., 2014). De récents résultats obtenus par Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) indiquent que la réponse PPS d'un limon A2 est nettement différente de celle du même limon traité à la chaux et au ciment (Kaouane, 2016). Les deux matériaux ont été compactés à des masses volumiques apparentes sèches et des teneurs en eau massiques proches de celles de leur Optimum Proctor Normal (OPN). La réponse du matériau traité est évolutive dans le temps.

La mise en place de la PPS et de la polarisation provoquée dans le domaine de temps (PP) nécessite la prise en compte de nombreux facteurs pour la mise en place sur le terrain afin d'obtenir un signal exploitable, ce qui en fait une technique encore peu utilisée en ingénierie. Dans le cas du suivi de l'évolution d'une structure, il faut de plus s'assurer

que le montage en place est robuste (conditions climatiques, stabilité de la mesure) et requiert peu d'intervention humaine entre son installation et son démontage.

L'expérimentation présentée ici vise à étudier la faisabilité in situ de la méthode PP pour le suivi de la solidification du matériau traité : (1) valider la différence de réponse entre le milieu traité au liant hydraulique et le milieu naturel ainsi que l'évolution de la réponse du milieu traité avec le temps de cure ; (2) appréhender les difficultés de mise en place. Dans cette première approche, l'aspect détection de la géométrie d'un objet de type écran étanche (faible épaisseur, grande hauteur) n'est pas abordé. Un profil PP a été installé sur une digue expérimentale en limon A2 dans laquelle une tranchée a été remplie du même limon traité avec 11% massique de ciment et un ajout d'eau suffisant pour rendre le mélange autoplaçant. On décrit le dispositif ainsi que les choix des paramètres d'acquisition.

2. Polarisation Provoquée

2.1. Principe

Dérivée des méthodes de résistivité électrique, la PP consiste en l'injection d'un courant pulsé entre deux électrodes de courant et la mesure de la tension entre deux électrodes de potentiel. Dans le domaine de temps, le signal est similaire à la méthode de résistivité électrique. Le courant consiste en une alternance de temps d'injection, T_{ON} , et de temps de coupure, T_{OFF} (Figure 1). Ceci permet d'obtenir l'impédance entre les dipôles ainsi qu'une courbe de décroissance capacitive à la coupure de l'impulsion de courant, appelée courbe de chargeabilité.

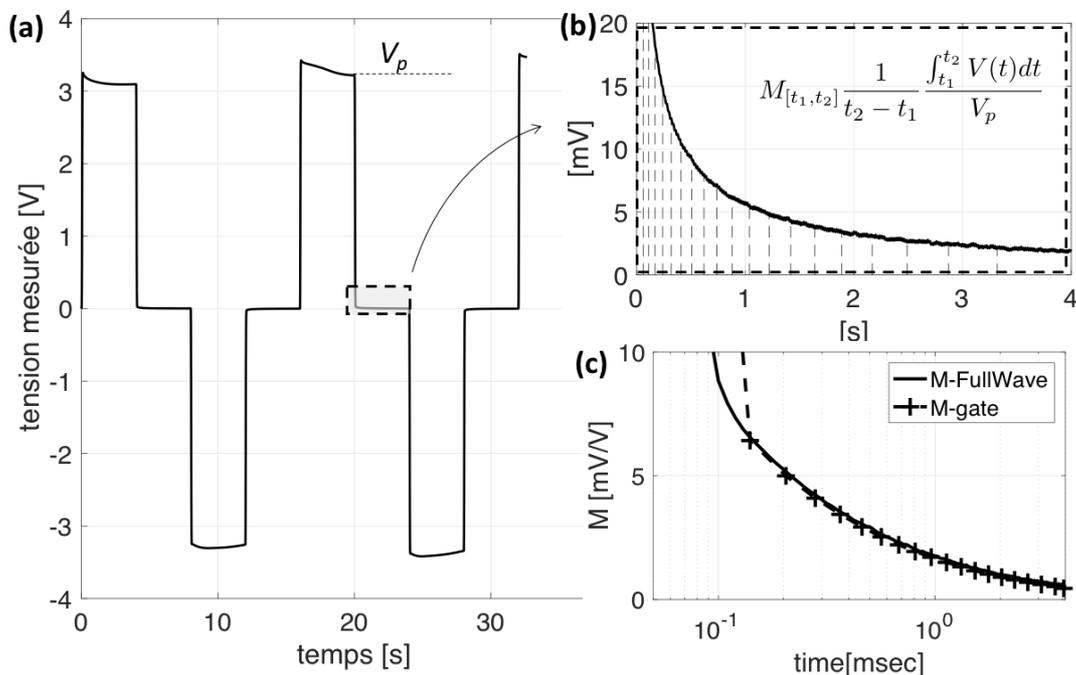


Figure 1 : Exemple de mesure de polarisation provoquée, réalisée sur un quadripôle du montage ci-après. a) Forme complète de la tension mesurée aux bornes des électrodes de potentiel ; b) Zoom sur la courbe de décharge. Les lignes pointillées verticales représentent les fenêtres de temps pré-programmées dans le système de mesure (Cole-Cole) c) Courbe de chargeabilité calculée à partir de la courbe (b) en trait noir plein et la courbe moyenne obtenue sur 9 répétitions à partir des fenêtres pré-programmées.

La chargeabilité représente le potentiel de polarisation du milieu, c'est-à-dire la quantité de charges électriques qui ne peuvent plus se déplacer librement dans le milieu sous l'effet de l'injection d'un courant continu. À la coupure du courant, la courbe de chargeabilité représente le retour à l'équilibre des charges électriques dans le milieu. Les propriétés électrochimiques des interfaces, la géométrie du réseau poreux et la composition de l'électrolyte dans le milieu influencent ce phénomène de polarisation et les temps de retour à l'équilibre (relaxation). La chargeabilité est calculée à partir de la tension mesurée soit en enregistrant le signal complet soit en moyennant sur des fenêtres (Figure 1b). Ces fenêtres doivent être choisies telles que la courbe de chargeabilité est correctement reproduite (Figure 1c).

Dans le domaine fréquentiel, le courant est généralement une sinusoïde. La PPS balaye une plage de fréquences, entre le mHz et le kHz, et est principalement utilisée en laboratoire. La PP permet des mesures plus rapides mais pour un contenu fréquentiel plus limité en basse fréquence que la PPS. On peut relier mathématiquement les résultats PP (domaine de temps) et PPS (domaine fréquentiel) (Revil et al, 2014).

2.2 Contraintes

Les principales contraintes liées à l'application de la méthode PP sont les phénomènes de couplages et la polarisation au niveau des électrodes. Une mauvaise disposition des câbles d'injection et de mesure peut provoquer le mouvement des charges dans le milieu par induction électromagnétique. Il faut s'assurer que les électrodes de potentiel ne mesurent pas de polarisation parasite. Cette polarisation est généralement due à des effets d'interface sol-électrodes, à des électrodes de potentiel trop proches des électrodes de courant, à un courant d'injection trop fort. Par ailleurs, la résistance de contact des électrodes de potentiel doit être minimisée.

3. Montage expérimental

3.1 Le site

Le site à disposition est une digue en limon A2 naturel, compacté initialement à 96% de sa masse volumique sèche à l'OPN ($1,75 \text{ t/m}^3$) et à une teneur en eau de 14,9%. Le site de mesure est connu (Charles et al., 2014). Ce limon a été prélevé à la pelle mécanique dans une tranchée de 1,4 m x 0,7 m x 0,5 m. Le volume de l'excavation a été évaluée à $0,406 \text{ m}^3$ par la mesure classique et à $0,422 \text{ m}^3$ par photogrammétrie. Environ 625 kg de limon extrait (masse humide, à une teneur en eau moyenne de 18 %) ont été malaxés avec 75 kg de ciment CEMIII/C 32,5 N et 200 L d'eau puis remis en place dans la tranchée (11% massique de ciment, 40-45% massique d'eau). La masse volumique du mélange en place est évaluée à 2 t/m^3 .

3.2 Dispositif de mesure

On conserve une approche de tomographie de résistivité électrique (TRE), centrée et longitudinale à la digue et à la tranchée (Figure 2a). Les dispositions respectives des électrodes (géométrie et distance) dictent les volumes de matériau intégrés dans la mesure réalisée. Plus les dipôles de mesure sont éloignés, plus le volume pris en compte dans la mesure sera grand. Les dipôles doivent donc être suffisamment petits pour s'assurer que certaines mesures représentent principalement la réponse du mélange sol-ciment, en minimisant les effets de bord.

Pour limiter la polarisation d'électrode, on utilise des électrodes non polarisables (type Petiau) pour la mesure de potentiel. On estime l'espacement minimal possible à 20 cm, pour éviter la polarisation résiduelle possible aux électrodes de courant (électrodes inox en pointes). Compte tenu des contraintes et des dimensions de la tranchée, on utilise une configuration de type équatoriale (Figure 2b). On dissocie la ligne de d'injection de la ligne de mesure de potentiel (2 câbles). Les lignes sont parallèles, espacées de 20 cm. L'espacement des électrodes sur chaque ligne est de 20 cm également. Le profil fait 4 m de long.

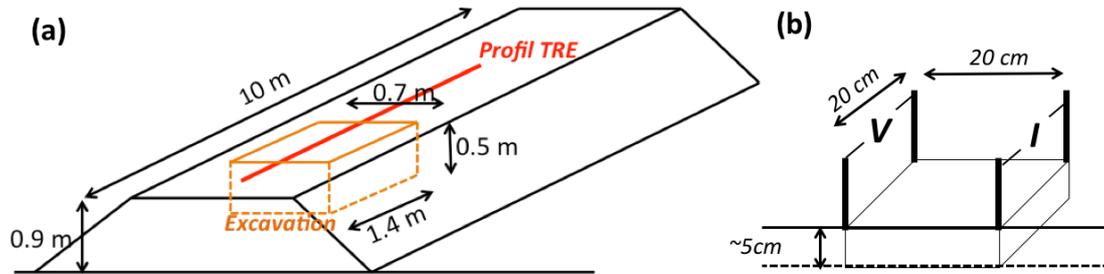


Figure 2 : Schéma de la digue et du quadripôle de mesure. a) Dimensions de la tranchée avec positionnement du profil TRE ; b) Dimensions du quadripôle de mesure et évaluation de sa profondeur d'investigation. V représente le dipôle de potentiel et I le dipôle de courant.

Un gabarit en bois a été conçu pour permettre un montage rapide et le maintien des électrodes en place. On s'approche autant que possible de l'hypothèse des électrodes ponctuelles : les électrodes d'injection sont enfoncées de 2 à 3 cm dans le sol et les électrodes non polarisables (NP) reposent sur le milieu (enfoncement de 1 à 2 cm). Une "chaussette" en géotextile au pied des électrodes NP est ajoutée pour faciliter leur retrait du mélange sol-ciment en fin de suivi (au cas où le mélange, une fois durci, adhérerait à l'électrode). L'effet de couplage dû aux câbles est limité par une disposition qui empêche la présence de boucles, et qui les éloignent du sol (Figure 3a).

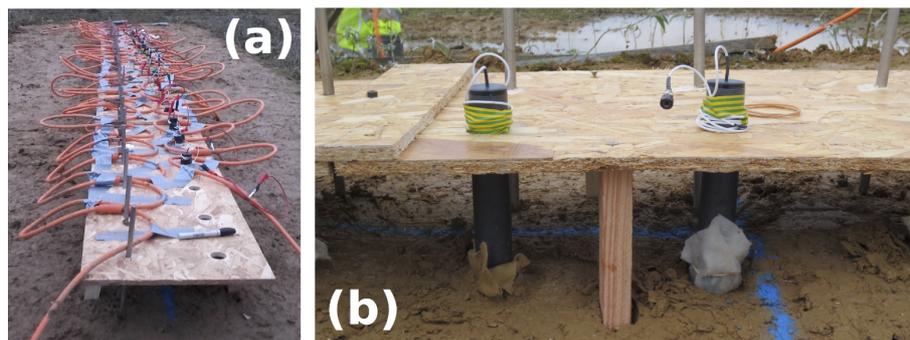


Figure 3 : Présentation du montage. a) Gabarit utilisé pour les électrodes d'injection et de mesure ; b) Montage des électrodes NP.

Le montage est couvert par une bâche sur toute la durée de l'expérimentation. Les mesures ont été réalisées en janvier 2017 et le montage a été soumis à des intempéries fortes : épisodes de vents violents et de gel sur une dizaine de jours.

3.3 Paramètres d'acquisition

Le système d'acquisition utilisé est un Syscal Pro piloté par le logiciel Comsys (Iris Instruments) ce qui permet la prise de mesure en continu, et l'enregistrement des données directement sur ordinateur.

Les dipôles sont interrogés selon une séquence qui oblige un espacement suffisant entre les dipôles de deux mesures consécutives pour limiter l'effet de polarisation résiduelle à l'interface électrodes/sol suite à une injection de courant.

Pour faciliter l'automatisation de l'acquisition, les paramètres doivent être constants sur les 30 jours. Entre autres, le choix des temps T_{ON} et T_{OFF} doivent être choisis en adéquation avec les temps de relaxation du milieu. Les caractéristiques du milieu traité vont évoluer avec la cure, et par conséquent, les temps de relaxation aussi. De par une précédente expérience, une bonne partie de l'information nécessaire est comprise entre les fréquences 0,1 Hz et 100 Hz (Kaouane, 2016), soit 100 ms à 10 s. On estime qu'une $T_{OFF} = T_{ON} = 4$ s est un bon compromis pour toute la durée du suivi.

La courbe de chargeabilité est obtenue avec une distribution de fenêtres pré-programmée par le constructeur (distribution dite "Cole-Cole", 20 fenêtres de chargeabilité).

Ces choix sont validés en testant le montage pendant 10 h sur le limon naturel en place, supposé homogène, avant la mise en place de la tranchée. D'une part, le choix des fenêtres reconstitue correctement la courbe de chargeabilité (Figure 1c). D'autre part, la répétabilité est correcte. Sur 9 mesures consécutives, les 20 quadripôles ont un écart-type moyen inférieur à 0,6 mV/V et 10 sont inférieurs à 0,05 mV/V. Par ailleurs, l'ensemble des quadripôles donnent des résultats similaires. (Figure 4). L'écart-type est plus grand pour des temps courts car la fenêtre d'intégration est plus faible.

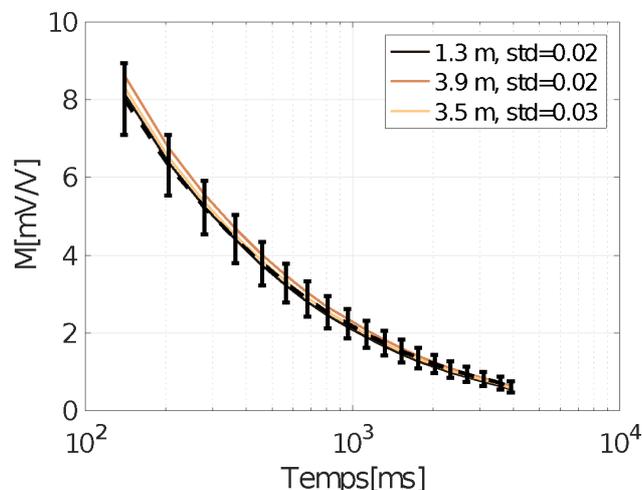


Figure 4 : Courbes de chargeabilité moyennes et écarts type obtenus pour quelques quadripôles lors de mesures de répétabilité avant la mise en place de la tranchée. La courbe en pointillés noirs est la moyenne des mesures moyennes de chaque quadripôle et l'écart-type associé.

On choisit de limiter l'injection de courant en fixant la différence de potentiel mesurée à 800 mV. Une intensité de courant trop forte peut entraîner une polarisation aux électrodes et une intensité trop faible réduit le ratio signal/bruit.

On s'assure que les résistances de contact restent inférieures à 20 kOhm (Kiberu, 2002) sur toute la durée du suivi.

4. Résultats

4.1 Suivi des matériaux

Pour plus de clarté, on expose ici uniquement les mesures pour quatre dipôles : deux sur le milieu naturel centrés à 2,9 m et 3,5 m sur le profil, ainsi que deux sur le milieu traité centrés à 0,7 m et 0,9 m. Les résultats montrent une évolution nette de la résistivité du mélange, plus conducteur au départ que le sol naturel (limon) qui tend ensuite à devenir aussi résistant que celui-ci. Une correction linéaire en température est appliquée (selon Zisser et al., 2010), qui permet d'observer différentes cinétiques d'évolution (lignes noires pointillées sur la Figure 5). À défaut de capteur de température, la correction est appliquée en supposant que les variations de résistivité électrique du limon naturel sont uniquement liées aux variations de température du milieu extérieur (données de station météorologique). Les valeurs de résistivité obtenues et leurs variations sont cohérentes avec les résultats de Kaouane (2016) pour un limon A2 traité avec 1% massique de chaux et 5% massique ciment compacté (13 Ohm.m à 5 jours et 22 Ohm.m à 16 jours).

Lors de la mise en place, le mélange à l'état frais, encore visqueux, est électriquement très conducteur. Au fil de la prise et du durcissement, les molécules d'eau sont consommées, ce qui diminue progressivement la conduction ionique. Une partie de l'eau libre peut aussi s'évaporer par le haut, ou geler, ce qui induit aussi un milieu électriquement plus résistant. On s'attend à une forte consommation de molécules d'eau dès le départ pour hydrater les anhydres puis à une cinétique de réaction plus lente, ce qui expliquerait les changements de pentes.

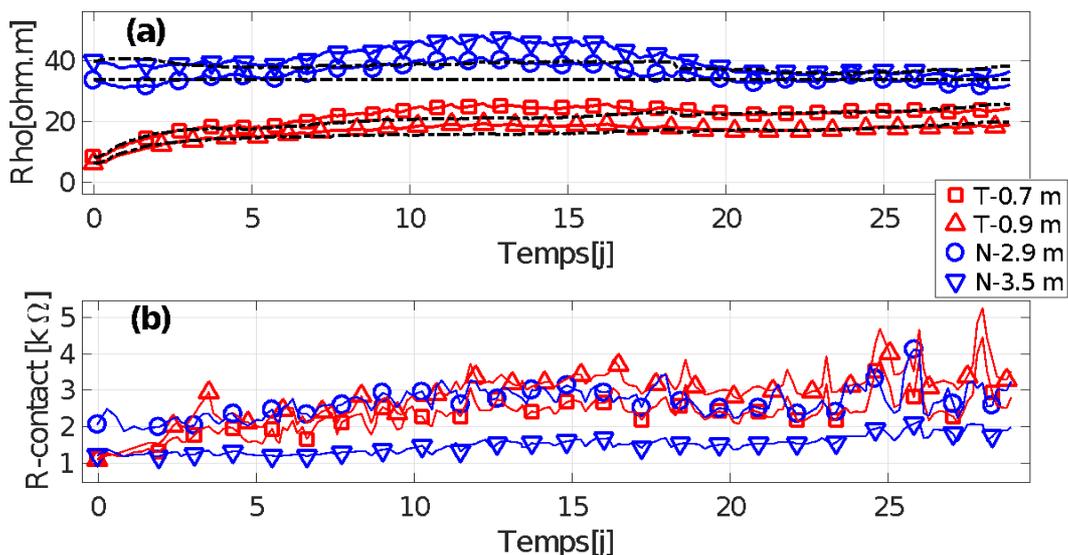


Figure 5 : Mesures de résistivité électrique au cours du temps pour deux dipôles localisés sur le limon traité et deux dipôles localisés sur le limon naturel. a) Mesures brutes (symboles) et corrigées en température (ramenées à 8°C) (en lignes pointillées) ; b) Évolution des résistances de contact au cours du suivi pour les points présentés en (a).

Les courbes de chargeabilité montrent des évolutions notables en amplitude et en inflexion, qui peuvent sans doute être expliquées par les réactions liées à la solidification (Figure 6). On supprime les parties de courbes associées à des temps < 150 ms qui sont influencées par des effets de couplages et de filtre du système (Gazoty et al., 2013). On ne sait pas avec certitude si la chargeabilité est influencée par la température (Zisser et al 2010, Revil et al, 2017).

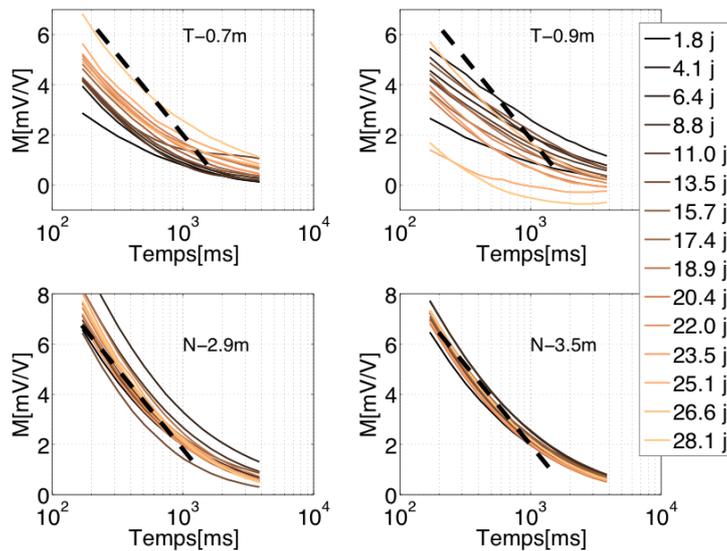


Figure 6 : Courbes de chargeabilité en fonction du temps. La ligne pointillée noire identique sur chaque graphique met en évidence les variations d'inflexion.

4.2 Validation du montage

Les résistances de contact suivent les variations de température mais restent généralement inférieures à 10 kOhm. Le gel ou la solidification du milieu traité sont des causes d'augmentation de cette résistance.

Les chargeabilités sur le limon naturel montrent une faible variabilité temporelle, ce qui valide la qualité du montage sur les 30 jours. Sur 12 mesures localisées dans le limon naturel, 8 ont un écart-type inférieur à 1 mV/V dont 6 inférieur à 0,6 mV/V. Dans l'hypothèse où la chargeabilité est indépendante de la température, on en déduit que la précision de nos mesures est environ de 1 mV/V.

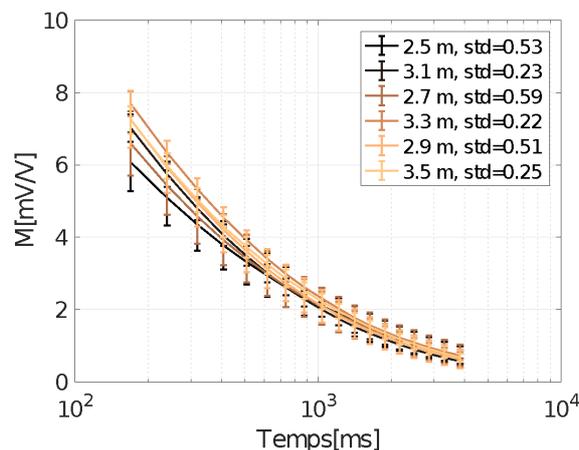


Figure 7 : Répétabilité sur le milieu naturel au cours des 30 jours de suivi.

5. Conclusions

Cette étude est à notre connaissance la première qui s'intéresse à l'effet PP pour le suivi in situ de la solidification de sols traités au ciment. La méthodologie choisie est simple et proche des conditions réelles dans un cadre d'exploitation pour la géotechnique. Cette étude de faisabilité répond aux objectifs initiaux : (1) le limon naturel et le limon traité

montrent des réponses différentes en résistivité et en chargeabilité apparente, et la réponse PP du limon traité évolue dans le temps ; (2) les résultats sur le milieu naturel montrent une bonne répétabilité, ce qui valide la stabilité du montage sur la durée. De plus, l'expérimentation s'est tenue dans des conditions météorologiques défavorables (épisodes de vent, pluie puis gel), ce qui vient appuyer la robustesse du dispositif.

Cette étude de faisabilité montre l'intérêt de développer la méthode PP pour le suivi de la solidification des sols traités mais elle reste limitée pour délivrer une interprétation plus formelle des résultats. Les réactions physico-chimiques ont pu être stoppées ou modifiées par les épisodes de gel, et il n'y a pas eu de mesures complémentaires en continu (température, prélèvements) pour le démontrer.

Parce que la réponse PP est directement influencée par la microstructure et la physico-chimie des interfaces, elle présente un fort potentiel de développement pour le suivi de réactions. C'est aussi la seule méthode non destructive connue qui peut permettre d'obtenir un ordre de grandeur de la perméabilité hydraulique in situ. Les travaux se poursuivent actuellement pour quantifier l'évolution des courbes de chargeabilité en fonction du temps de cure et concevoir un protocole en laboratoire comprenant des analyses physico-chimiques et l'observation de la microstructure.

6. Remerciements

Les auteurs remercient profondément Myriam Schmutz, INP Bordeaux, et Michel Chouteau, École Polytechnique de Montréal, pour leurs conseils et leur suivi ; Abderrahim Jardani, Université de Rouen pour le prêt d'électrodes ; le Cerema et les techniciens du Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) ainsi que l'IFSTTAR- GERS/GeoEND.

7. Références bibliographiques

- Charles I., Herrier G., Chevalier Ch., Durand E., Puiatti D., Fleureau J.-M., Taibi S., Bonelli S., Fry J.-J. (2014). A real scale experimental dike in lime-treated soil : Evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance. *International Conference on Scour and Erosion ICSE7*, Perth, Australia.
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2013). Data repeatability and acquisition techniques for time-domain spectral induced polarization. *Near Surface Geophysics*, 11(1983), 391–406.
- Kaouane, C. (2016). Polarisation Provoquée Spectrale appliquée à la caractérisation géotechnique des sols : Application pratique en laboratoire. PhD Thesis. Ecole Polytechnique de Montreal.
- Kiberu, J. (2002) Induced Polarization and Resistivity Measurements on a Suite of Near Surface Soil Samples and Their Empirical Relationships to Selected Measured Engineering Parameters. MSc Thesis, ITC, Enschede.
- Revil, A., Florsch, N., & Camerlynck, C. (2014). Spectral induced polarization porosimetry. *Geophysical Journal International*, 198, 1016–1033.
- Revil, A., Coperey, A., Shao, Z., Florsch, N., Fabricius, I. L., Deng, Y., ... Gunnink, J. L. (2017). Complex conductivity of soils. *Water Resources Research*, 53(8), 7121–7147.
- Weller, A., Slater, L., Binley, A., Nordsiek, S., & Xu, S. (2015). Permeability prediction based on induced polarization: Insights from measurements on sandstone and unconsolidated sample spanning a wide permeability range, 80(2). <http://doi.org/10.1190/geo2014-0368.1>
- Zisser, N., Kemna, A., & Nover, G. (2010). Dependence of spectral-induced polarization response of sandstone on temperature and its relevance to permeability estimation. *Journal of Geophysical Research*, 115(B9), B09214.