

RELATION ENTRE MESURES DCP ET MESURES PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE SUR UN SITE TEST A L'ECHELLE 1:1

REJIBA F.¹, FAUCHARD C.⁴, FINCO C.¹, SCHAMPER C.², BODET L.², DELAURE E.⁵, DELAGE P.⁵, CAVALCANTE FRAGA L.H.³, JACQUELINE D.⁴, FLEITZ P.⁶

¹ Université de Rouen Normandie, UMR CNRS 6143 M2C, Mont-Saint-Aignan, France
faycal.rejiba@univ-rouen.fr

² Sorbonne Université, UMR SU CNRS EPHE 7619 METIS, Paris, France

³ Envisol, Rouen, France

⁴ Cerema Normandie Centre, France

⁵ École des Ponts ParisTech, UMR 8205 Navier/CERMES, France

⁶ Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA

RESUME

Un site test à l'échelle 1:1 a été construit au Centre d'Expérimentation et de Recherche sur le site de Rouen (76) du Cerema Normandie Centre pour étudier la corrélation entre la compacité du sol et les mesures géophysiques par induction électromagnétique (EMI). Le site test est constitué d'un matériau argilo-limoneux à des niveaux de compaction différents estimés par des mesures au pénétromètre dynamique (DCP). Dans cette étude, nous présentons les premiers résultats indiquant une relation claire entre l'index CBR (California Bearing Ratio) et les conductivités apparentes ou inversés obtenues avec des mesures EMI.

Mots clés : Pénétromètre dynamique, portance, méthode électromagnétique

RELATION BETWEEN MULTI-CONFIGURATIONS ELECTROMAGNETIC INDUCTION AND GEOTECHNICAL MEASUREMENTS (CBR/DCP) ON A 1:1 STANDARDIZED TEST SITE

ABSTRACT

In order to study the correlation between soil compactness and electromagnetic geophysical measurements, a full-scale test site has been built on the Cerema Normandy Center site at Rouen (76). The test site was constructed with a silty material at different levels of compaction. EMI (electromagnetic induction) mapping was done for different levels of compaction assessed with DCP (Dynamic Cone Penetrometer) measurements. In this study, we present some first results that indicate a clear relation between the CBR index (California Bearing Ratio) and the EMI apparent or inversed conductivity measurements.

Keywords: electromagnetic method, dynamic cone penetrometer, bearing capacity

INTRODUCTION

L'étude de la compacité des sols constitue un problème important que ce soit dans le domaine agricole, ou de l'aménagement des terrains superficiels. Les variations de compacité non seulement induisent une variation des propriétés structurales et hydriques, mais aussi hydrodynamiques. Actuellement l'étude de la portance ou de la compacité des terrains superficiels s'effectue essentiellement par l'intermédiaire d'essais géotechniques (essai Proctor modifié, œdomètre, pénétromètre dynamique). La mise en œuvre de méthodes géophysiques permettant la spatialisation de la compacité est modérément étudiée (e.g. Payne, 2008 ; Keller et al., 2013) mais surtout très peu appliquée. Un des gros défis à ce niveau concerne en particulier les sols peu drainants, où la présence d'une proportion importante d'argile mène à de nombreuses équivalences concernant les caractéristiques hydro-pédo-structurales des sols (Usaborisut et Ampanmanee, 2015 ; Islam et al., 2014).

Dans le cadre de cette étude, on se propose d'illustrer la relation entre une mesure standard de résistance de pointe à l'aide d'un pénétromètre dynamique et les méthodes de reconnaissance géophysique. Pour cela, un site test à l'échelle 1:1 a été construit sur le site du Cerema Normandie Centre, à Rouen (76).

L'objectif de ce site test est de pouvoir analyser la réponse de différentes méthodes de cartographie géophysique, en particulier électromagnétique, pour différents niveaux de compaction (Rejiba et al., 2019). Trois zones de 5 m * 7 m ont donc été compactées de manière différente avec des objectifs CBR distincts (Fig. 1). Sur chacune de ces zones, des mesures géotechniques ont été effectuées (DCP, CBR, Dynaplaque, teneur en eau, densité), ainsi que des mesures géophysiques (cartographie électromagnétique multi-configuration, tomographie de résistivité électrique, sismique).

Il s'agira d'abord de présenter les caractéristiques et les étapes de construction du site test, les données géotechniques standards des différentes zones, ainsi que les résultats de la reconnaissance géophysique. Le terrain naturel constitue un élément clef de l'interprétation des données acquises sur le site test, car pour la plupart des mesures géophysiques, il a une influence non négligeable sur le paramètre géophysique mesuré.

Ensuite, on montrera les premiers résultats mettant en perspective les relations potentielles entre la compacité et la conductivité électrique apparente calibrée et inversée.

CARACTERISTIQUES DU SITE TEST

La principale difficulté lors de la conception d'un site test consiste à en assurer un minimum de représentativité et une taille suffisante pour y mettre en œuvre les instruments géophysiques commerciaux dans des conditions usuelles. Dans le cas présent, la principale contrainte a été de se situer dans des conditions similaires à une parcelle test localisée à Grostenquin (Moselle, France), devant à terme servir de site test en conditions réelles. Le sol sur cette parcelle est constitué de limons argileux sur plus de deux mètres de profondeur. Pour cette raison, le site test en conditions contrôlées a été construit avec un matériau argilo-limoneux aux propriétés électriques similaires. Il est important de noter que le sol support est constitué de remblais sur environ deux mètres d'épaisseur puis d'une formation argileuse à silex. Ce contraste de propriétés électriques (conducteur - site test / résistant - remblais / conducteur - argile à silex) offre une perspective intéressante pour l'étude de sensibilité lors de la résolution du problème inverse en géophysique.

En ce qui concerne la géométrie, l'objectif est de pouvoir mettre en œuvre des méthodes géophysiques sur une surface suffisante permettant de limiter l'influence des bords. Pour l'épaisseur, il a fallu trouver un compromis entre d'une part une épaisseur minimale permettant d'intégrer une réponse significative du matériau mis en place avec différents niveaux de compactage, et d'autre part la contrainte économique liée au volume de matériau à mettre en place. Le site test a une dimension rectangulaire utile (hors rampe d'accès et talus) de 39 m * 5 m. Son épaisseur est de 75 cm (+ ou - 2 cm). Le matériau qui a été extrait de La Crique (Normandie, France) est un limon argilo-sableux dont la granulométrie indique que 80% des grains ont un diamètre inférieur à 100 µm. Ce sol correspond à un limon de type A1 selon la classification française (NF P11-300). L'analyse au diffractomètre RX indique une forte proportion de quartz, feldspath, hématite et d'argile. Une analyse au MEB indique que la fraction argileuse de ce limon est principalement constituée de kaolinite et d'illite. Sa résistivité électrique DC est de l'ordre de 60 Ωm. L'Optimum Proctor Normal se situe à une teneur en eau de 16,85 % pour une densité sèche de 1,71 t/m³.

Le site test, représenté en **Fig. 1**, a été construit en plusieurs étapes. Trois zones ont été compactées différemment avec des teneurs en eau massiques et des densités distinctes. Les zones 1 et 2 ont des densités similaires, mais des teneurs en eau massiques distinctes, alors que les zones 2 et 3 ont des teneurs en eau massiques similaires et des densités distinctes (**Tab. 1**). Pour calculer la médiane des teneurs en eau et des densités, on a utilisé 18 échantillons par zone, 6 échantillons par couche. La mise en place de l'ensemble du site s'est faite en trois couches de 25 cm après compactage pour atteindre une épaisseur totale de 75 cm.

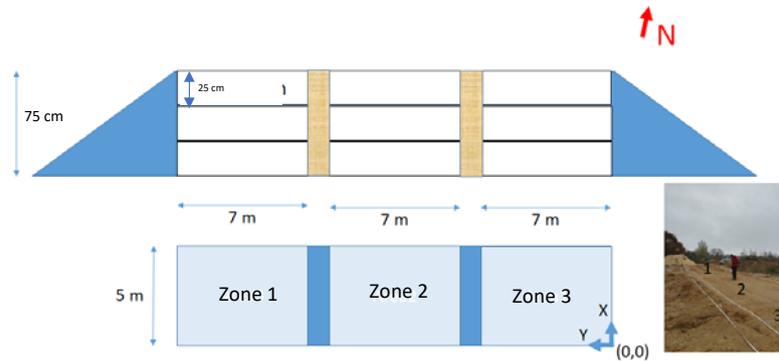


Fig. 1 - Schéma d'implantation du site test

Teneur en eau	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Densité	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Médiane	17.85	17.19	17.07	Médiane	1.99	1.98	1.85
Ecart-type	0.99	1.66	1.36	Ecart-type	0.17	0.06	0.04

Tab. 1 - Teneur eau massique et densité sèche (t/m^3), (18 échantillons par zone)

RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 illustre les premiers résultats issus du traitement des données EMI apparentes en quadrature et calibrées. La correction des données EMI a été effectuée en supposant que le panneau électrique constituait une référence, qui sert de base à une inversion (« smooth ») des données EMI suivant une méthodologie décrite dans Calvacante Fraga et al. (2018). Afin d'identifier les tendances des indices CBR issues des essais DCP avec celles des conductivités électriques provenant des prospections EMI, un calage aux moindres carrés avec une fonction simple de type polynomiale a été proposé. Sur chacune des zones, une augmentation de la portance représentée par l'indice CBR est systématiquement associée à une augmentation de la résistivité inversée suivant un modèle dit « smooth » incluant des couches fines de même épaisseur. Les zones 1 et 2 sont semblables du point de vue de la portance avec une augmentation avec la profondeur, alors que la zone 3 est clairement plus homogène avec des indices CBR plus faibles.

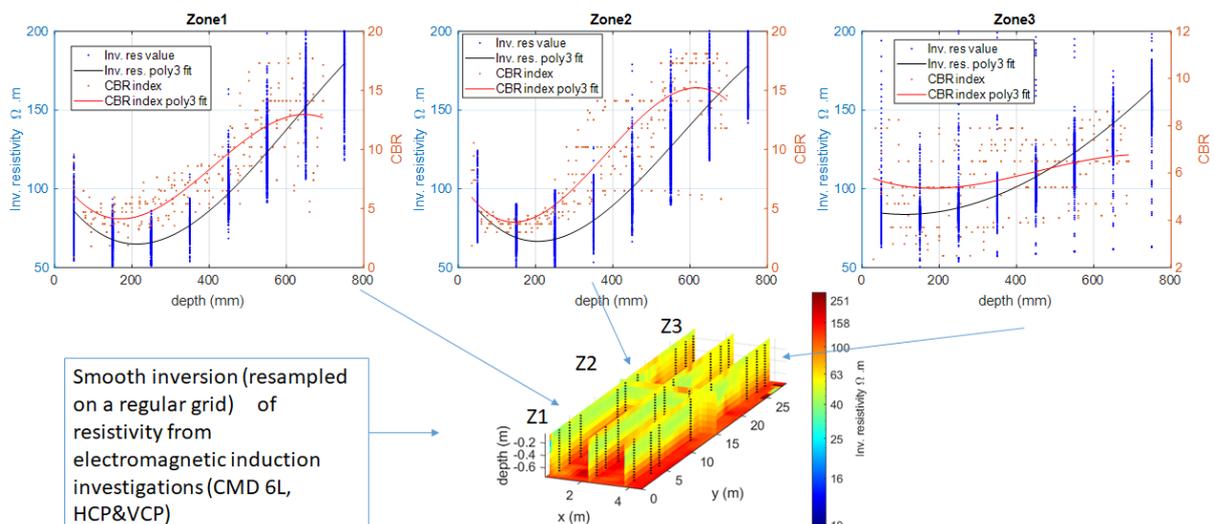


Fig. 2 - Comparaison entre les valeurs d'indice CBR (California Bearing Ratio) et les résistivités inversées sur chaque zone du site test. L'inversion est de type « smooth ». Les données ont été acquises avec un CMD 6L (compagnie GF Instruments), incluant les modes HCP et VCP. Les résultats dont les résidus d'inversion sont supérieurs à 2 ont été enlevés du jeu de données. Les lignes en pointillés noirs sur le volume de résistivités inversées correspondent à la position des essais DCP.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La construction du site test au Cerema a vocation à développer les protocoles d'évaluation des liens entre compacité (sur une gamme d'indice CBR variant entre 3 et 15) et des mesures géophysiques sur un même matériau argilo-limoneux, ce qui constitue un contexte inaccessible à notre connaissance à cette échelle.

Le site test permet de disposer de trois zones indépendantes suffisamment accessibles pour des prospections usuelles, et caractérisées par une variabilité intrinsèque qui leur est propre en ce qui concerne la portance (déduite d'essais DCP), la teneur en eau, la densité, ... Ce site est par ailleurs protégé des intempéries et pérenne.

A cette échelle, et étant donné la faiblesse des variabilités des densités sèches et de teneurs en eau pondérales entre les zones compactées, les résultats illustrant les variations de portance et de résistivité électrique sont très encourageants. Ils permettent de montrer, à l'échelle réelle en conditions contrôlées et pour différents niveaux de compactage d'un même matériau, la possibilité de relier propriétés électromagnétiques acquises à l'avancement par méthode EMI et indice CBR-DCP. L'établissement formel de ce lien, dans ce contexte, et sa justification pétrophysique est un travail en cours.

Dans un premier temps, il s'agit de poursuivre l'interprétation en y incluant la partie en phase et les données multifréquences des données électromagnétiques qui ont été acquises avec un GEM-2 (compagnie Geophex) et d'autres dispositifs expérimentaux prototypés, afin d'identifier si la permittivité diélectrique apparente, voire les propriétés magnétiques, permettent d'améliorer l'identification de ce lien. Dans un deuxième temps, il s'agira de proposer et d'évaluer un lien formel (stochastique, statistique, géostatistique, ...), valable pour cette typologie de matériau, que ce soit pour une seule propriété géophysique ou une combinaison de propriétés.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Université de Dayton Research Institute et du laboratoire de recherche de l'armée de l'air américaine AFRL - Air Force Research Laboratory (Grant # FA9550-19-1-7041).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAVALCANTE FRAGA, L.H., SCHAMPER, C., NOEL, C., GUERIN, R. AND REJIBA, F., 2019 – Geometrical characterization of urban fill by integrating the multi-receiver electromagnetic induction method and electrical resistivity tomography: A case study in Poitiers, France. *European Journal of Soil Science*, 70(5), pp.1012-1024.

KELLER T., LAMANDÉ M., PETH S., BERLI M., DELENNE J.Y., BAUMGARTEN W., RABELL W., RADJAI F., RAJCHENBACH J., SELVADURAI A.P.S., OR D., 2013 – An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil and Tillage Research*, 128, pp.61-80.

ISLAM M.M., SAEY T., DE SMEDT P., VAN DE VIJVER E., DELEFORTRIE S., VAN MEIRVENNE M., 2014 – Modeling within field variation of the compaction layer in a paddy rice field using a proximal soil sensing system. *Soil use and management*, 30(1), pp.99-108.

PAYNE J.M., 2008 – Identification of Subsoil Compaction Using Electrical Conductivity and Spectral Data Across Varying Soil Moisture Regimes in Utah.

REJIBA, F., SCHAMPER, C., BODET, L., FLEITZ, P., CERANSKI, A., FRAGA, L.C., FINCO, C. AND LEVAILLANT, R., 2019 – Relation between DCP data and geophysical measurements on unimproved landing zones. In *SAGEEP 2019* (Vol. 2019, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

USABORISUT P., AMPANMANEE J., 2015 – Compaction properties of silty soils in relation to soil texture, moisture content and organic matter. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 10, pp.178-185.