

# Un pénétromètre dynamique électrique léger pour l'investigation des sols de marais

## A lightweight electrical dynamic penetrometer for investigating marsh soils

Ibtihal H. SALIM<sup>1,2</sup>, Stephen HEDAN<sup>1</sup>, Laurent CANER<sup>1</sup>, Philippe COSENZA<sup>1\*</sup>

*1 Université de Poitiers CNRS, Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers-IC2MP, ENSI Poitiers, Poitiers, France*

*2 Département de Génie Civil, Faculté d'Ingénierie, Université de Samarra, Samarra, Irak*

*\*philippe.cosenza@univ-poitiers.fr*

**RESUME :** Cette communication présente les résultats préliminaires d'un projet de recherche visant à développer un pénétromètre léger capable de mesurer simultanément la résistance mécanique dynamique et la résistivité électrique des sols de marais. L'objectif est d'améliorer la caractérisation des sols de marais, très compressibles et présentant des gradients de salinité significatifs. La méthodologie ici proposée combine une approche expérimentale, utilisant la pointe du pénétromètre PANDA® comme électrode d'injection de courant, et une approche théorique fondée sur un modèle 1D de résistivité à trois couches. Le dispositif a été testé sur le terrain dans le marais communal du Poiré-sur-Velluire (marais Poitevin), et les résultats obtenus constituent les premiers éléments d'une démonstration de faisabilité du concept.

**ABSTRACT:** This paper presents the preliminary results of a research project aimed at developing a lightweight penetrometer capable of simultaneously measuring the dynamic mechanical strength and electrical resistivity of marsh soils. The objective is to improve the characterisation of marsh soils, which are highly compressible and exhibit significant salinity gradients. The methodology proposed here combines an experimental approach, using the tip of the PANDA® penetrometer as a current injection electrode, and a theoretical approach based on a 1D three-layer resistivity model. The device was tested in the field in the communal marsh of Le Poiré-sur-Velluire (Poitevin marsh), and the results obtained constitute the first elements of a "proof-of-concept".

**Mots-clés :** pénétromètre dynamique léger PANDA®, résistivité électrique, sols de marais.

## 1 INTRODUCTION

Les sols des marais littoraux de la façade atlantique sont caractérisés par une forte compressibilité due à leur composition élevée en argile molle et/ou en tourbe. Cette caractéristique géotechnique rend délicate toutes constructions de grande ampleur et toutes interventions motorisées lourdes pour leur reconnaissance. En outre, ces sols de marais peuvent présenter des gradients de salinité à la fois verticaux et horizontaux qu'il convient de caractériser pour des objectifs agronomiques et/ou pédologiques (e.g., Caner et al., 2024).

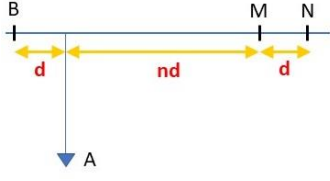
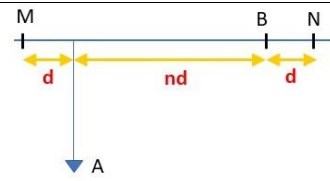
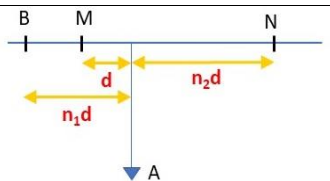
Dans ce contexte, l'utilisation de dispositifs légers de reconnaissance des sols et la mesure de la résistivité électrique sensible aux variations de salinité apparaissent particulièrement adaptées. Nous présentons les résultats préliminaires d'un projet visant à développer un dispositif léger de pénétrométrie combinant des mesures de résistance mécanique dynamique et de résistivité électrique.

## 2 DEVELOPPEMENTS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX

### 2.1 Le concept général

Il s'agit (i) d'utiliser la pointe d'un pénétromètre comme électrode d'injection de courant électrique (électrode A) (le train de tiges étant isolé électriquement) et (ii) de mesurer une résistivité du terrain à l'aide de 3 électrodes supplémentaires (électrodes B, M et N) branchées, en surface, à un résistivimètre (Tableau 1 et Figure 1). La résistivité mesurée est dite « apparente », suivant la terminologie consacrée en géophysique, car elle ne correspond pas à celle d'un sol donné mais constitue une moyenne complexe des résistivités des constituants du terrain situés entre la pointe du pénétromètre et la surface du sol. Le tableau 1 présente une première synthèse des configurations possibles d'électrodes.

Tableau 1. Exemples de configuration d'électrodes.

Configuration	Géométrie	Coefficient géométrique $k$	Commentaires
Merkel $\alpha$		$\frac{d}{k(z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + n^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + (n+1)^2}} - \frac{1}{(n+1)(n+2)} \right]$	Le dispositif a été étudié de manière exhaustive par R. Merkel (Merkel, 1970 ; 1971). On note que si $z/d \ll 1$ (avec $n \geq 1$ ) alors le coefficient géométrique $k$ devient indépendant de la profondeur de l'électrode-pointe A.
Merkel $\beta$		$\frac{d}{k(z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + n^2}} + \frac{n+1}{n+2} \right]$	Configuration Merkel $\alpha$ avec permutation des électrodes B et M. On note que si <ul style="list-style-type: none"> <li><math>z/d \ll 1</math> (<math>n \geq 1</math>) alors le coefficient <math>k</math> devient indépendant de <math>z</math>.</li> <li><math>n=1</math> alors le coefficient <math>k</math> devient indépendant de <math>z</math>, quel que soit <math>d</math> (i.e., <math>\frac{d}{k(z)} = \frac{1}{3\pi}</math>).</li> </ul>
Merkel généralisé		$\frac{d}{k(z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 + n_2^2}} - \frac{1}{n_1 - 1} + \frac{1}{(n_1 + n_2)} \right]$	On note que si : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>z/d \ll 1</math> (<math>n_2 \geq 1</math>) alors le coefficient <math>k</math> devient indépendant de <math>z</math>.</li> <li><math>n_1 \rightarrow \infty</math> et <math>n_2 \rightarrow \infty</math> alors la configuration dite pôle-pôle modifiée est obtenue avec  <math display="block">\frac{1}{k} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} \right] = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{z^2 + d^2}} \right]</math> </li> </ul>

Le tableau 1 indique également pour chaque configuration l'expression du coefficient géométrique,  $k$ , nécessaire au calcul de la résistivité apparente,  $\rho_a$ , à partir de la résistance électrique,  $R$ , mesurée par le résistivimètre :

$$\rho_a = kR = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

avec  $\Delta V$  la tension électrique mesurée aux bornes des électrodes M et N ;  $I$  : le courant électrique injecté aux bornes des électrodes A et B. Ce coefficient géométrique est calculé classiquement avec l'équation suivante (e.g., Florsch et Muhlach, 2018) :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (2)$$

Les distances (AM), (BM), (AN) et (BN) dépendent de la configuration d'électrodes retenue pour la mesure de la résistivité apparente,  $\rho_a$ .

Les noms des dispositifs indiqués dans le tableau 1 font référence aux travaux de Richard Merkel (Merkel, 1970 ; 1971 ; Snyder et Merkel, 1973) qui ont investigué, de manière la plus exhaustive, la méthode de la résistivité électrique avec une électrode enterrée.

Suivant les configurations données dans le tableau 1, on suppose ici que (a) le train de tiges est isolé électriquement du terrain (i.e., pas de contact électrique entre les tiges et le sol, à l'exception évidemment de la pointe qui doit rester solidaire du terrain) et (b) les quatre électrodes sont supposées ponctuelles (i.e., leurs dimensions : diamètre et longueur/profondeur d'enfoncement pour B, M et N sont petites devant la plus petite distance entre électrodes).

## 2.2 Interprétation quantitative des valeurs de résistivité apparente

La résistivité apparente,  $\rho_a$ , mesurée par un quadripôle électrique est donc une moyenne complexe des valeurs des résistivités des constituants du terrain. En effet, la

mesure de  $\rho_a$  intègre non seulement la distribution spatiale (volumique) des résistivités des matériaux mais également prend en compte la disposition des 4 électrodes (ici 3 en surface et 1 en profondeur) utilisées dans la mesure.

Le profil  $\rho_a(z)$  ( $z$  étant la profondeur du cône) obtenu par le pénétromètre électrique est interprété quantitativement en considérant un modèle de terrain 1D à trois couches (Figure 1).

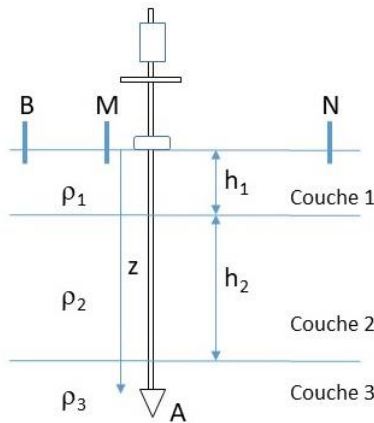


Figure 1. Modèle 1D à 3 terrains utilisé pour l'interprétation quantitative des profils  $\rho_a(z)$ . Le pénétromètre électriques et ses 4 électrodes, A, B, M et N sont également indiqués.

Ce choix d'un modèle simple repose sur deux arguments. D'une part, les sols des marais dits « desséchés » (e.g., Bernard, 2006) montrent, au premier ordre, une organisation tabulaire à trois couches avec de la surface vers la profondeur : (a) une couche de sol soumise à des cycles d'immersion et de dessiccation saisonniers avec un degré de saturation en eau variable (i.e., couche 1 de résistivité  $\rho_1$  et d'épaisseur  $h_1$  de la figure 1), puis une couche saturée en permanence (i.e., couche 2 de résistivité  $\rho_2$  et d'épaisseur  $h_2$  de la figure 1) et enfin le substratum (i.e., couche 3 de résistivité  $\rho_3$  et d'épaisseur supposée infinie de la figure 1). D'autre part, nous voulions développer un outil numérique léger (léger comme le pénétromètre) facilement programmable en VBA (Visual Basic for Applications) dans l'application Excel.

Ce modèle 1D tabulaire à 3 couches permet donc de calculer un profil théorique  $\rho_a(z)$  exprimé en fonction des 5 paramètres du modèle :  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $h_1$ , et  $h_2$ . Les expressions analytiques de  $\rho_a(z)$  suivant la profondeur  $z$  de l'électrode-cône A, écrites sous forme d'intégrales impropres (i.e., infinies) de fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 sont données dans Merkel (1970 ; 1971) et Snyder et Merkel (1973). Elles sont obtenues suivant la méthodologie décrite dans le célèbre papier de Stefanescu et al. (1930). Elles

ont été programmées en VBA et disponibles dans une macro sous Excel. C'est cette macro qui sera utilisée dans la section 3.4 pour l'interprétation quantitative des données de terrain.

### 2.3 Essais préliminaires au laboratoire

Le concept de pénétromètre électrique développé dans ce travail a été mis en œuvre sur le dispositif commercial PANDA®, pénétromètre dynamique léger à énergie variable (dans sa version 2) (e.g., Gourvès et Barjot, 1995). On notera que le concept peut être déployé *a priori* sur n'importe quel type de pénétromètre dynamique léger. Le PANDA®, d'une masse totale maximale de 20 kg, présente l'avantage d'enregistrer numériquement la profondeur de la pointe et la résistance dynamique associée. Il a été utilisé dans cette étude dans sa configuration « pointe perdue » i.e., avec une pointe de 4 cm<sup>2</sup> de section de diamètre supérieure à celui d'une tige PANDA® (2 cm<sup>2</sup> de section). Ce choix permet de limiter les frottements du terrain sur le train de tiges

La première étape de cette mise en œuvre a été d'imaginer un moyen d'isoler électriquement le train de tiges métalliques, du terrain à traverser. Nous nous sommes tournés vers une solution basée sur une gaine thermo-rétractable couramment utilisée pour isoler des câbles électriques. Après plusieurs essais, nous avons retenu une gaine thermo-rétractable en polymère à paroi fine, restreint 3 :1 (diamètre intérieur initial de 18 mm et diamètre minimal de 6 mm). L'épaisseur de cette gaine après retreint est de 0.8mm, i.e., suffisamment petite pour que le diamètre, tige+gaine, reste inférieure à celui de la pointe perdue.

Chaque tige de longueur 500 mm du PANDA® a été alors préparée selon procédure suivante :

- Préparation de la surface de la tige : chaque tige a été soigneusement nettoyée afin d'éliminer toutes traces de graisse et de saletés, garantissant ainsi une adhérence optimale entre l'acier et le polymère.
- Application de la gaine : une gaine polymère a été positionné sur la tige, en laissant un débord suffisant d'environ 1 cm à chaque extrémité afin d'assurer une couverture complète de la tige.
- Thermo-rétraction : la tige ainsi gainée a été installée dans un four calibré, à environ 105,5 °C pendant environ 80 minutes. Ce chauffage a permis d'assurer un rétrécissement uniforme de la gaine sur la longueur de la tige, éliminant les poches d'air et créant une barrière diélectrique étanche et sans discontinuité.

Afin de s'assurer de l'adhérence parfaite polymère-acier, une tige ainsi gainée a été immergée verticalement dans une solution de fluorescéine, un traceur fluorescent jaune très visible, pendant une

heure (durée maximale d'un sondage pénétrométrique). Après une heure d'immersion, la gaine a été retirée pour inspection visuelle. Les observations ont confirmé que la migration du traceur avait été limitée à une distance de moins de 0.5 cm aux extrémités de la tige, démontrant ainsi que la gaine constituait une barrière efficace contre la pénétration de liquide le long de l'interface gaine-tige (ou polymère-acier).

### 3 APPLICATIONS IN SITU DU DISPOSITIF

#### 3.1 Le site d'essai : le marais communal du Poiré-sur-Velluire

Ce dispositif léger de pénétrométrie électrique, constitué du PANDA®, de tiges gainées et d'un résistivimètre portable de type Chauvin Arnoux CA 6460 a été testé sur le marais communal du Poiré-sur-Velluire, un marais dit « desséché » du Parc Naturel Régional du Marais Poitevin.

Ce marais communal a été classé en Réserve Naturelle Régionale (RNR) en 2012. Le marais est une prairie naturelle humide, pâturée depuis le XII<sup>e</sup> siècle en pâturage plurispécifique (vaches, chevaux, oies). Le marais de 241 ha n'aurait jamais été travaillé, au sens agronomique. Cette prairie humide n'est utilisée pour le pâturage qu'une partie de l'année lorsque le marais est « sec » et que la portance des sols est suffisante pour les animaux. En hiver le marais est couvert d'eau douce provenant de la pluie, il n'est qu'en partie alimenté par le fossé de ceinture lors des épisodes de crue.

Une synthèse des résultats obtenus par différentes études menées sur le site permet de proposer une organisation verticale des sols composée de la superposition de trois couches d'épaisseur variable (Caner et al., 2024) :

- i- Une couche argileuse superficielle non saturée. Cette couche est elle-même composée verticalement de deux sous-unités : (a) une couche de sol (30 à 40 cm d'épaisseur) correspondant à une « croûte » sèche très résistante tant sur le plan mécanique (résistance  $qd$  supérieure à 10 MPa) qu'électrique (résistance électrique de plusieurs dizaines d'ohm.m), et (b) une couche de sol meuble qui s'étend jusqu'à une profondeur de 60 à 90 cm correspond à la zone de fluctuation d'une nappe superficielle.
- ii- Une couche de sol argileux saturé composée en partie d'une couche d'argile très molle et plastique (au sens des limites d'Atterberg), riche en argile liquide et d'épaisseur très variable.

- iii- La troisième couche mise au jour dans ce marais est une formation calcaire. Elle correspond très probablement aux formations calcaires jurassiques du Bajocien (J2) et du Bathonien (J3) présentes au nord du marais, selon la carte géologique de Marans au 1/50 000.

#### 3.2 Essais préliminaires *in situ*

Avant de réaliser les mesures couplées  $qd(z)$  et  $\rho_a(z)$ , nous avons voulu vérifier que la présence d'une membrane polymère gainant les tiges n'induisait pas de frottements parasites. Dans cet objectif, deux couples de sondages pénétrométriques ont été effectués. Pour chaque couple de sondages, un sondage avec tiges gainées et un sondage avec tiges non gainées (les deux sondages étant distants de 10 cm) ont été réalisés sur le site d'essai. Les résultats donnés dans la figure 2 montrent une similitude satisfaisante entre les valeurs de résistance  $qd$  obtenues par sondages avec gaines et celles obtenues sans gaine thermo-rétractable. Les faibles différences observées ont été attribuées à la variabilité spatiale naturelle des propriétés des sols mis en jeu.

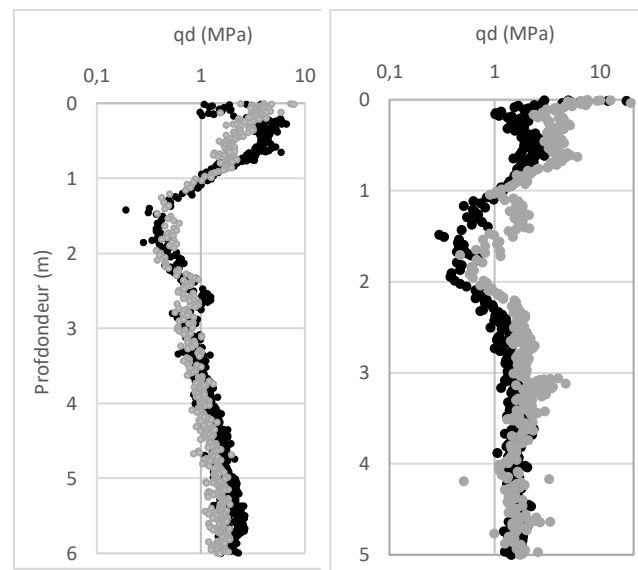


Figure 2. Pénétragrammes de deux couples de sondages. Chaque couple consiste en un essai avec gaine (points noirs) et un essai sans gaine (points gris) ; les deux essais de chaque couple étant séparés d'une distance de 10 cm.

#### 3.3 Procédure expérimentale

La campagne expérimentale réalisée en septembre 2024 a été menée suivant une procédure à deux étapes.

Dans une première étape, deux couples de tomographies de résistivité électrique (TRE) perpendiculaires et ayant le même centre ont été réalisées sur le site d'essai dans une zone où le

substratum calcaire pouvait être atteint par la pointe du pénétromètre. Chaque couple de TRE a été acquis avec un resistivimètre Syscal R1+, dans une configuration d'électrodes Wenner-Schlumberger avec 24 électrodes (121 quadripôles mesurés). Le premier couple de TRE et le deuxième couple ont été mis en œuvre respectivement dans une direction Ouest-Est et Sud-Nord. Chaque couple de TRE consistait en (i) une TRE de distance inter-électrodes de 0.5 m (profondeur d'investigation estimée à 2.5 m) et (ii) une TRE avec une distance inter-électrodes de 1 m (profondeur d'investigation estimée à 5 m). L'objectif de cette campagne de TRE était double. D'une part, ils devaient confirmer l'hypothèse de tabularité (à l'échelle du prospect) utilisée dans le modèle à trois terrains de la Figure 1. D'autre part, les valeurs de résistivité inversées des TRE étaient destinées à être comparées à celles obtenues par le même modèle pour l'interprétation quantitative des données du pénétromètre électrique (voir section 3.4).

Dans une deuxième étape, le même jour, un sondage pénétrométrique couplée à un profil de résistivité apparente  $\rho_a(z)$  a été réalisé à l'intersection i.e., au centre de chaque couple de TRE. Le profil de  $\rho_a(z)$  a été obtenu avec un pas d'échantillonnage de 10 cm dans une configuration pôle-pôle modifiée (ou Merkel généralisé avec  $n_1 \rightarrow \infty$  et  $n_2 \rightarrow \infty$  voir Tableau 1). En pratique, les électrodes B et N, dites « à l'infini » ont été installées diamétralement opposées de l'aplomb du sondage pénétrométrique et à 40 m de ce dernier (la profondeur du substratum correspondant à la profondeur maximale du sondage étant estimée à 4 m). L'électrode de potentiel M a été placée à 10 cm de l'aplomb du sondage (dans l'alignement des électrodes B et N) afin d'assurer une zone d'investigation la plus proche du sondage.

Le choix de la configuration pôle-pôle modifiée ou Merkel généralisé tient à deux raisons. D'une part, la configuration pôle-pôle classique (i.e., électrodes A, B, M, et N disposées en surface avec B et N installées « à l'infini ») en prospection électrique est connue pour avoir une profondeur d'investigation importante, comparativement à d'autres configurations (e.g., Wenner ou dipôle-dipôle). D'autre part, elle est souvent considérée comme offrant une meilleure représentation des variations latérales de résistivité électrique du sous-sol (e.g., Florsch et Muhlach, 2018).

### 3.4 Résultats et discussion

Les deux couples de TRE présentées sur les figures 3 et 4 ont été obtenues par inversion à l'aide du logiciel RES2DINV®. Le processus d'inversion utilisé dans ce programme repose sur une méthode des moindres carrés contrainte par la méthode dite d'Occam. Nous avons choisi les options d'inversion suivantes : (a) La méthode « conventionnelle » des moindres carrés avec contrainte de régularité ou méthode d'inversion de norme l2 ; (b) Un raffinement du maillage du modèle permettant d'obtenir des cellules de modèle d'une largeur égale à la moitié de l'espacement des électrodes utilisé sur le terrain, afin d'obtenir des résultats plus précis lorsque d'importants changements de résistivité sont attendus près de la surface du sol, (c) Un nombre maximal d'itérations égal à 7 pour le processus d'inversion.

Les résultats des figures 3 et 4 confirment les éléments suivants :

- i. A l'échelle du prospect (quelques centaines de m<sup>2</sup>), le terrain peut être considéré comme tabulaire i.e. pas de pendage significatif des formations et interfaces mises en jeu, pas de variation latérale importante de la résistivité. On notera ainsi la forte similitude des sections de résistivité inversée des deux couples de TRE perpendiculaires.
- ii. L'organisation du sous-sol en 3 couches est également confirmée. La première couche en surface d'épaisseur 0.9-1 m possède des valeurs de résistivité inversée dans la gamme 10-50 ohm.m. Elle représente la couche de sol désaturé. La deuxième couche de valeurs de résistivité comprises entre 5 et 10 ohm.m correspond au sol argileux saturé encore appelé « bri » du marais Poitevin. La troisième couche, la plus profonde, est le substratum calcaire. Elle est associée à des valeurs de résistivité inversée comprises entre 10 et 50 ohm.m. Son toit est situé à environ 3.5 – 4 m de profondeur. On note que le toit n'est pas caractérisé par une discontinuité franche de résistivité mais plutôt par une zone d'augmentation progressive de résistivité (i.e., un dégradé de couleurs, du bleu clair vers le rouge foncé).

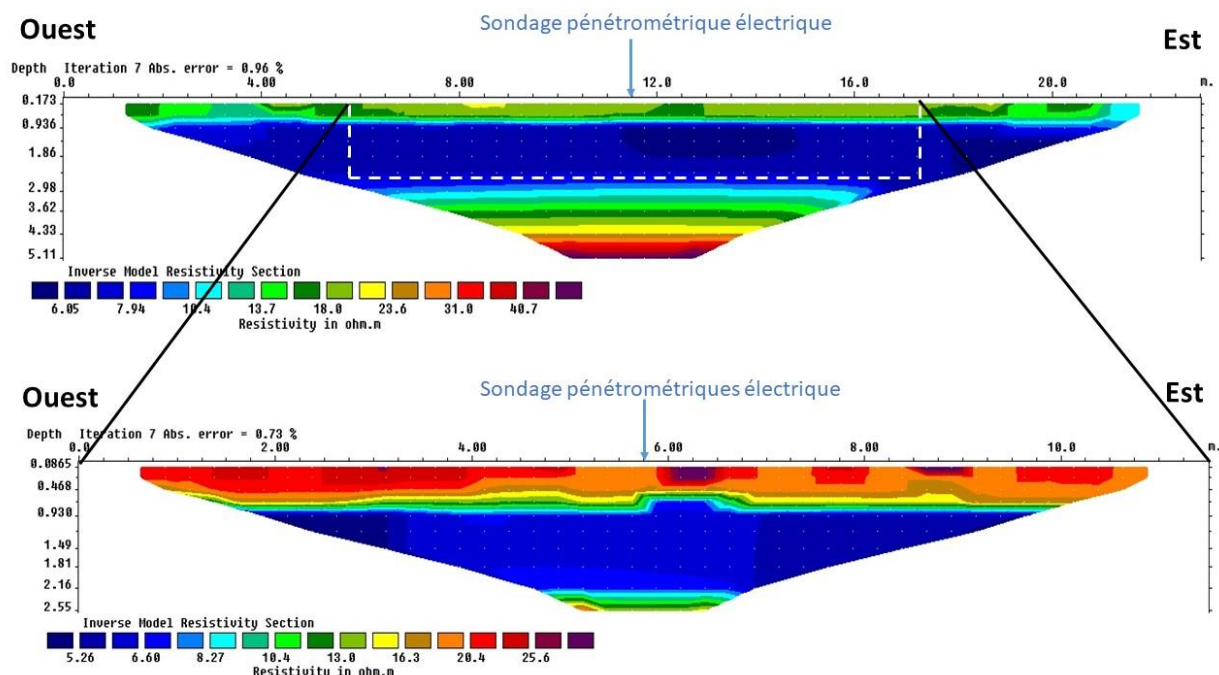


Figure 3. Tomographies de résistivité électrique centrées sur un sondage pénétrométrique électrique, orientées Ouest-Est et réalisées avec deux espacements inter-électrodes ( $e=1\text{ m}$  en haut et  $e=0.5\text{ m}$  en bas).

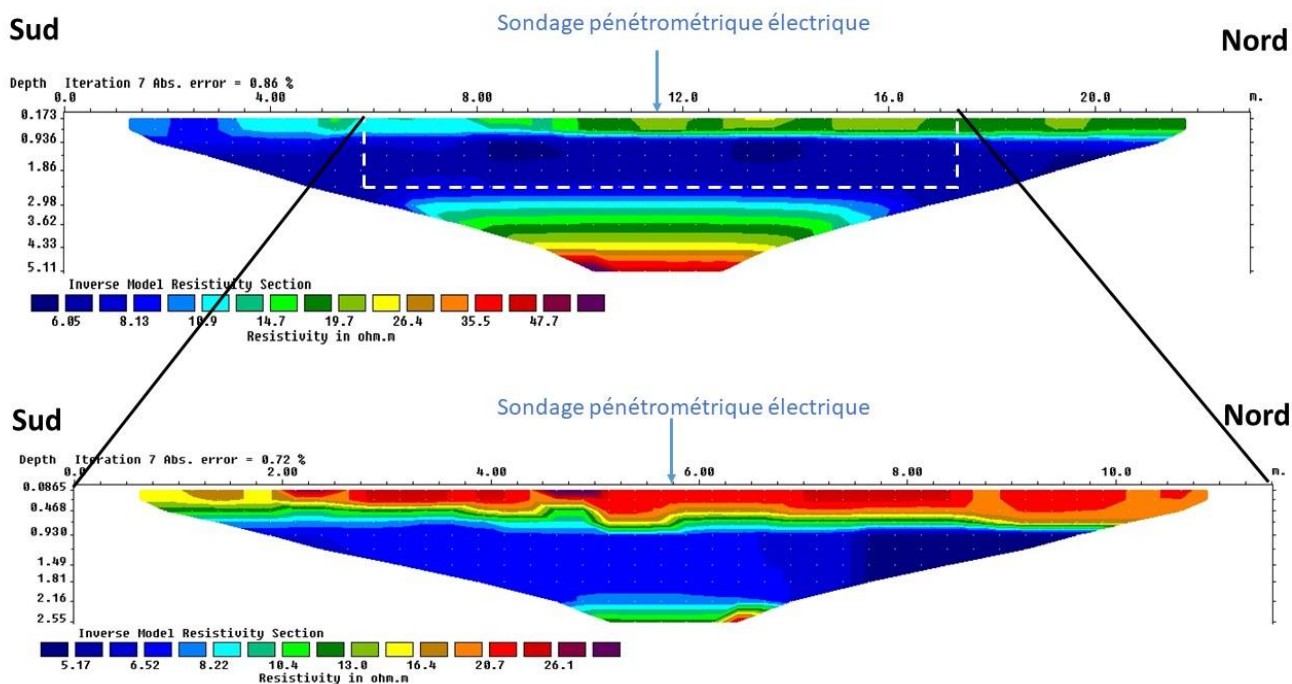


Figure 4. Tomographies de résistivité électrique centrées sur un sondage pénétrométrique électrique, orientées Sud-

Le toit du substratum a été confirmée à 4.0 m par les données de résistance de pointe,  $qd$  (Figure 5a). En effet, le pénétrogramme de la figure 5a indique bien une augmentation de  $qd$  à 4 m et montre par ailleurs d'autres caractéristiques intéressantes, de haut au bas du profil :

i. Une couche superficielle d'environ 0.6 m d'épaisseur montrant des valeurs de  $qd$  supérieures à 1 MPa (valeur maximum de 11.87 MPa à une

profondeur de 0.14m). Cette zone est clairement à associer à la couche de sol non saturé et compact, la plus superficielle des sections TRE.

ii. Les valeurs de  $qd$  diminuent progressivement jusqu'à 1.5m pour atteindre des valeurs très faibles jusqu'à une valeur minimum de 0.31 MPa à une profondeur de 2.12 m. Le sol argileux possédant des valeurs de  $qd$  inférieures à 1 MPa peut être qualifié d'argile très molle selon la classification

de Langton (1999) établie pour le PANDA®. Cette argile très molle correspond également à des bancs décimétriques d'argile dans un état liquide au sens des limites d'Atterberg, comme l'attestent des mesures sur le site (Caner et al., 2024).

- iii. A partir de 2.1m, la valeur de  $qd$  augmente progressivement pour atteindre le toit du substratum à 4.0m (valeur de  $qd$  égale à 3.39 MPa).

D'une manière intéressante, on observe que le profil de résistivité apparente  $\rho_a(z)$  présenté sur la

a)

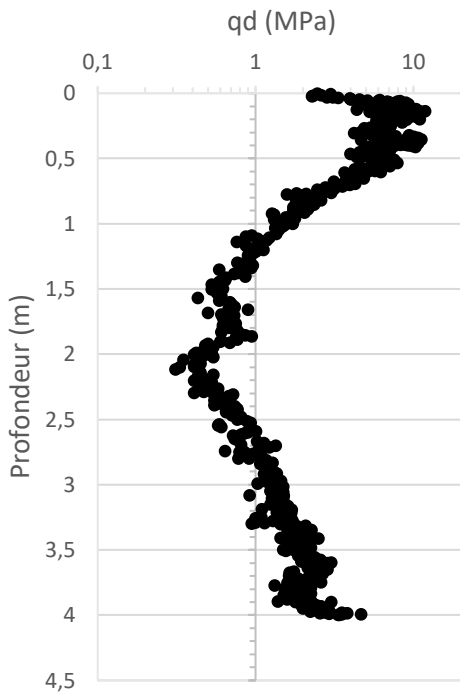


figure 5b. suit qualitativement la même évolution que le profil  $qd(z)$ . Ainsi, depuis la surface du sol,  $\rho_a(z)$  augmente progressivement jusqu'à une profondeur de 0.5 m (maximum de 16.1 ohm.m) dans le sol non saturé puis décroît progressivement pour atteindre une valeur minimum de 13.8 ohm.m à une profondeur de 1.61m dans l'argile saturée très molle saturée. Puis,  $\rho_a(z)$  réaugmente progressivement jusqu'au substratum (valeur maximale de 19.52 MPa).

b)

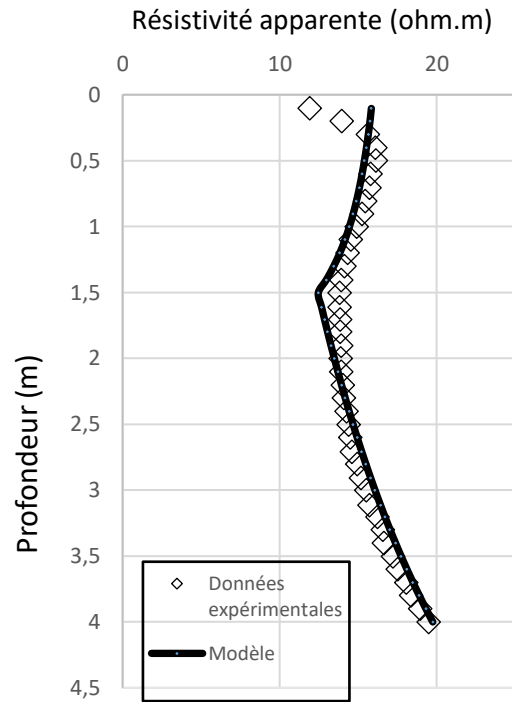


Figure 5. Essai au pénétromètre électrique réalisé sur le site du Poiré-sur-Velluire, le 16 octobre 2025. a) Pénétrogramme de l'essai ; b) Profils  $\rho_a(z)$  mesuré et  $\rho_a(z)$  calculé par le modèle 1D.

La figure 5b montre le meilleur ajustement manuel obtenu entre les données expérimentales  $\rho_a(z)$  et les valeurs calculées par le modèle 1D à 3 couches. L'ajustement a été effectué de manière à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre données expérimentales et valeurs théoriques calculées (RMSE de 0.902 sur la figure 5b). On donne dans le tableau 2 les valeurs obtenues des paramètres du modèle.

Tableau 2. Valeurs optimisées du modèle 1D

Paramètres du modèle	Valeurs
Résistivité sol 1, $\rho_1$ (ohm.m)	16
Épaisseur sol 1, $h_1$ (m)	1.5
Résistivité sol 2, $\rho_2$ (ohm.m)	7.5
Épaisseur sol 2, $h_2$ (m)	2.6
Résistivité sol 3, $\rho_3$ (ohm.m)	30

Au regard de la simplicité du modèle, la figure 5b montre un accord plutôt satisfaisant entre données expérimentales et valeurs du modèle. En outre, les valeurs du tableau 2 sont cohérentes avec les données obtenues par TRE. L'épaisseur du sol 1 i.e., 1.5 m, semble être toutefois surestimée par le modèle mais correspond à une transition observée au pénétrogramme et sur le profil  $\rho_a(z)$ .

En outre, on note que le modèle rend difficilement compte de 2 caractéristiques observées sur le profil  $\rho_a(z)$ . Premièrement, le modèle ne permet de reproduire les valeurs de  $\rho_a$  sur les 30 premiers centimètres. Ceci tient à l'hypothèse de ponctualité des électrodes qui n'est pas ici satisfaite sur ces très faibles profondeurs, au regard de la faible distance entre la pointe A et l'électrode M. Rappelons que cette

hypothèse est utilisée à la fois par le modèle mais aussi également pour le calcul du coefficient géométrique  $k$ . Deuxièmement, le modèle montre clairement à 1.5 m, une transition (rupture de pente) associée à l'interface couche 1/couche 2 ; ce que ne montre pas les données expérimentales  $\rho_a$ . Cette différence suggère que la l'interface géologique entre la couche 1 (non saturée) et la couche 2 (saturé) ne serait pas une discontinuité franche comme l'indique le modèle mais plutôt une zone de transition avec une certaine épaisseur.

On souligne ici que des essais similaires au pénétromètre électrique ont été réalisés à 1 m de distance de celui ici présenté, trois semaines plus tard, et ont montré une bonne reproductibilité des mesures.

#### 4 CONCLUSIONS

Afin d'améliorer la reconnaissance des sols de marais, fortement compressibles, riches en argile et/ou en tourbe et présentant des gradients de salinité significatifs, nous avons isolé électriquement les tiges du pénétromètre dynamique PANDA® pour lui permettre de combiner des mesures de résistance mécanique ( $qd$ ) et de résistivité électrique ( $\rho_a$ ). Les résultats encourageants présentés dans cette communication visaient à alimenter la démonstration de faisabilité (« proof-of-concept ») du dispositif imaginé.

Nos efforts actuels se portent actuellement dans trois directions : (a) confirmer les résultats obtenus sur d'autres sites de marais littoraux, (b) tester d'autres configurations d'électrodes et (c) concevoir un algorithme d'inversion (i.e., d'ajustement automatique) des paramètres du modèle 1D considéré.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Union européenne (FEDER), la Région Nouvelle-Aquitaine et le Parc Naturel Régional du Marais Poitevin (Mme D. Decoene) pour leur soutien financier et Mme N. Bouaziz pour son soutien technique. Les auteurs remercient également le ministère irakien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique et Campus France pour les allocations allouées à Mme I. Salim. Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme gouvernemental français « Investissements d'Avenir » (EUR INTREE, référence ANR-18-EURE-0010).

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bernard, M. (2006). *Étude des comportements des sols de marais: évolution minéralogique, structurale et hydromécanique.*(Marais de Rochefort et Marais Poitevin). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France.
- Caner, L., Pavageau, C., Decoene, D., Cosenza, P. (2024). Electrical, pedological and geotechnical characterisation of micro-reliefs (“mottureaux”) of the Poiré-sur-Velluire marsh (France). In *Journées Scientifiques AGAP Qualité 2024. E3S Web of Conferences* (Vol. 504, p. 04004). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450404004>.
- Florsch, N., Muhlach, F. (2018). *Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques* (Vol. 1). ISTE Group, London, UK. <https://doi.org/10.51926/ISTE.9781784054175>.
- Gourvès, R., Barjot, R. (1995). The Panda ultralight dynamic penetrometer. In *Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 133–138). Danish Geotechnical Society.
- Langton, D. D. (1999). The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Ground Engineering*, Sept, 33-37.
- Merkel, R. H. (1970). *Potential field development from steady-state current flow with buried sources in an inhomogeneous half-space*, PhD Thesis, The Pennsylvania State University, Penn State, PA, USA.
- Merkel, R. H. (1971). Resistivity analysis for plane-layer half-space models with buried current sources. *Geophysical Prospecting*, 19(4): 626-639.
- Snyder, D. D., Merkel, R. M. (1973). Analytic models for the interpretation of electrical surveys using buried current electrodes. *Geophysics*, 38(3): 513-529.
- Stefanescu, S., Schlumberger, C., Schlumberger, M. (1930). Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et le Radium*, 1(4), 132-140.