Caractérisation de structure de sols par couplage de mesures pénétrométriques, de résistivité et de compressibilité.

Bernard Marjorie, Dudoignon Patrick, Boulay Laurent

ESIP UMR 6532 du CNRS, 40 Av. du recteur Pineau,86022 Poitiers cedex
marjorie.bernard@esip.univ-poitiers.fr, patrick.dudoignon@esip.univ-poitiers.fr

RESUME. *Les évolutions de structure de sols de marais ont été étudiées à partir d'essais au pénétromètre PANDA, de profils de résistivité et densité. Les mesures in situ mettent en évidence un niveau consolidé de surface à l'état solide (W<Wp), un niveau intermédiaire état plastique à état pseudo- liquide (Wp>W>Wl) puis une consolidation progressive du matériau avec la profondeur. L'homogénéité du matériau argileux a permis d'étalonner la loi d'Archie et d'associer les évolutions verticales de structure du sol à sa courbe de retrait.*

ABSTRACT. *The structural evolution of soils of marsh was studied through cone resistance, resistivity and wet density profiles. From the surface to the depth, three layers are superimposed; a consolidated and unsaturated soil (W<Wp), an intermediate layer in plastic to pseudo-liquid state (Wp<W<Wl) and a progressive consolidation of the clay dominant material with depth. The homogeneous mineralogy and texture of the material allows the calibration of the Archie's law and the modelling of the soil behaviour on its shrinkage curve.*

MOTS-CLES : *sols argileux, zones humides, pénétromètre, résistivité, courbes de retrait, oedomètre*

KEYWORDS: *clay dominant soils, marsh, penetrometer, resistivity, shrinkage curves, oedometer*

1. Introduction

La poldérisation mise en place depuis le moyen âge dans les marais de l'Ouest a permis la maturation et la compaction des sédiments fluvio-marins argileux ('bri'). En surface ces sols argileux sont compacts, non saturés, proches de la limite de retrait du matériau. En profondeur, ils deviennent hydromorphes, saturés, avec des teneurs en eau supérieures à la limite de liquidité (Hallaire et al., 1996 ; Pons et al., 2000). La structure verticale ainsi développée, dans des milieux de salinité variable, justifie une méthodologie de reconnaissance basée sur le couplage pénétromètre-salinomètre. L'étalonnage a été réalisé dans les formations du marais de Rochefort,

dans un domaine de teneurs en eau « limite de retrait (Wr) – limite de liquidité (Wl) ». L'objectif du travail est d'associer aux domaines de la courbe de retrait du matériau ses évolutions de structure. Les profils structuraux du matériau sont également comparés aux propriétés de compressibilité des sols déduites des essais oedométriques.

2. Contexte géologique et méthodes

Les investigations ont été menées dans le Marais de Rochefort et dans le Marais Poitevin. Chacun de ces marais résulte du comblement par des sédiments fluvio-marins ('bri') d'un golfe créé par l'érosion des calcaires jurassiques sous jacents. La texture du matériau est fine avec 52% de fraction < 2µm et 35 % de fraction 2-20µm. La minéralogie des argiles, identifiées par diffraction de rayons X et par microanalyses chimiques, est constituée de kaolinite, illite, interstratifiés illite/smectite, smectite et accessoirement de chlorite. La minéralogie reste homogène sur les deux sites étudiés.

Au sein du Marais de Rochefort, les investigations ont été menées sur une parcelle en prairie du site expérimental de l'INRA de St Laurent de la Prée (2115550 lat.; 340530 long.). Dans le Marais Poitevin, elles ont été menées dans des parcelles en prairie sur la commune de Maillezais (2157455 lat.; 362260 long.). Elles comprennent des profils de résistances à la pointe mesurées au pénétromètre dynamique PANDA. Les mesures de résistance à la pointe sont étalonnées sur les mesures de densité et de teneurs en eau effectuées sur carottes d'échantillons intacts. Les corrélations résistances à la pointe (Qd) / teneurs en eau (W) / indice des vides (e) ont déjà été représentées dans les digrammes croisés Qd-W-e-Sat (Bernard et al., 2006). Les mesures de résistivités ont été effectuées par sondages électriques (configuration Schlumberger), par couplage pénétromètre - salinomètre jusqu'à 3 m de profondeur puis par panneaux électriques. Le salinomètre est constitué d'un cylindre de PVC (∅ = 1.5cm, h = 12cm) sur lequel sont montées quatre bagues de cuivre espacées de 3cm formant les électrodes ABMN. Ce dispositif permet de mesurer la résistivité d'une sphère de sol de 9 cm de diamètre. Le salinomètre est fixé en bout de tige de pénétromètre PANDA (Bernard et al., 2005). Il est enfoncé dans le trou du pénétromètre de manière à mesurer les résistivités réelles en fonction de la profondeur. Le résistivimètre est un Syscal R1+ connecté avec un switch pour les panneaux électriques. Les programmations des séquences de mesures ont été faites et téléchargées dans le résistivimètre à l'aide du logiciel Electre II. Les récupérations des données du résistivimètre vers l'ordinateur sont assurées à l'aide du logiciel ProsysII. Les panneaux de mesures sont interprétés par modélisation inverse (programme Res2Dinv ; figure 1).
Les mesures de Wr, Wp et Wl effectuées sur la fraction < 400µm ont été complétées par l'obtention des courbes de retrait sur éprouvettes cylindriques de matériau intact. Les dimensions initiales de ces éprouvettes sont de 2 cm de diamètre et 2 cm de hauteur. En cours de dessiccation, en plus de la masse, les hauteurs des éprouvettes

sont mesurées à l'aide de comparateurs (± 0.01mm) et leurs volumes sont mesurés par immersion dans le mercure. Les mesures de compressibilité à l'oedomètre ont été effectuées sur des échantillons intacts prélevés à 10, 25 et 45 cm de profondeur (état solide ; W<Wp) dans le Marais de Rochefort et à 70, 100 et 120 cm de profondeur (état plastique; W>Wp) sur le site de Maillezais.

3. Résultats

Tous les profils de résistance à la pointe (Qd) montrent un pic de consolidation de surface, maximum en saison sèche, diminué mais visible en saison humide. L'intensité maximum des pics est localisée à 20cm de profondeur (Qd maximum 12 MPa) (figure 2a). Les résistances à la pointe diminuent ensuite avec la profondeur : Qd<0.5 MPa à 1.10 m. Les profils de teneurs en eau montrent, en saison sèche, une évolution de Wr (20%) en surface à Wp (40%) puis W>Wl (75%) en profondeur. La profondeur de Wp correspond à l'arrêt de progression des fractures de dessiccation. La densité humide diminue avec la profondeur de 1.9 en surface à 1.4 à 2m (figure 3b). Aux fortes valeurs de Qd correspondent les fortes densités et les faibles teneurs en eau.

Les profils de résistivité sont cohérents avec les profils de teneurs en eau et d'indice des vides: la résistivité est maximale en surface au niveau du pic de consolidation (e=0.50 ; W=20%; ρ=15Ωm), elle diminue avec la profondeur pour atteindre 0.4Ωm à 2m de profondeur (e=1.95 ; W=90%) pour une salinité de fluide mesurée à St Laurent de la Prée de 54g/l.

Les résistivités mesurées jusqu'à 2m de profondeur et le prélèvement du fluide d'imbibition à différentes saisons nous ont permis de déterminer les coefficients α, m et n de la loi d'Archie (1942):

$$\rho_s = \alpha * \rho_w \phi^{-m} Sat^{-n}$$

avec ρ_s la résistivité du sol, ρ_w la résistivité du fluide d'imbibition, Φ la porosité et Sat l'indice de saturation.

Les mesures in situ de ρ_s et Φ en milieu saturé montrent une évolution linéaire du log (ρ_s/ρ_w) en fonction du log Φ. Les paramètres m et α de la loi d'Archie sont 2.73 et 1.01 respectivement. La valeur de n est classiquement prise égale à 2. La valeur de m est élevée mais cohérente avec la nature argileuse et riche en smectite du sédiment (Salem et Chilingarian, 1999) :

$$\rho_s = 1.01 * \rho_w \phi^{-2.73} Sat^{-2}$$

La stabilité minéralogique et structurale du sédiment permet de considérer ces deux coefficients comme étant constants sur les deux sites. Dans ces conditions la salinité du fluide peut être calculée lorsque la porosité est mesurée en partie supérieure de profil (figure 2b).

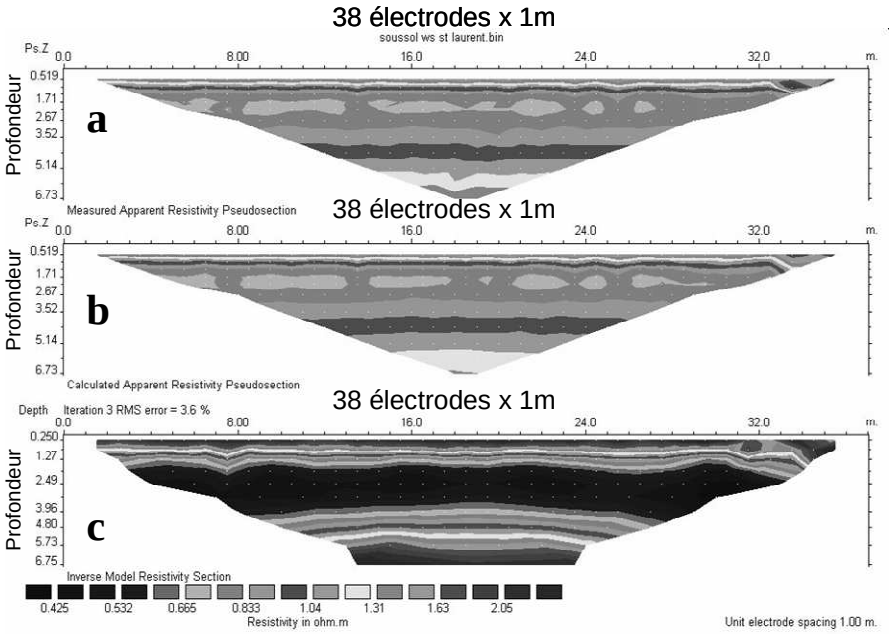

Figure 1. *Exemple de panneau électrique réalisé sur le site de St laurent de la Prée.* ***a*** *Mesures apparentes (Measured Apparent Resistivity Pseudosection),* ***b*** *Mesures apparentes recalculées à partir de la section modélisée (Calculated Apparent Resistivity Pseudosection),* ***c*** *Section modélisée par modèle inverse (Inverse Modèle Resistivity section).*

L'interprétation par modèle inverse des panneaux électriques montre une structuration horizontale du sous-sol. Dans un premier temps, les résistivités diminuent de la surface vers la profondeur pour atteindre 0.4Ωm à 2,5m de profondeur puis augmentent pour atteindre 2Ωm à 6,75m de profondeur (figure 1). Les profils de résistivité enregistrés avec le salinomètre se superposent parfaitement à la partie supérieure des profils de résistivité déduits des panneaux électriques (figure 2b). La loi d'Archie, si la salinité du fluide est connue ou fixée pour des profondeurs supérieures à 3m, permet de calculer le profil de porosité sur toute la profondeur d'investigation. Les profils de résistivité argumentent pour une subdivision du 'bri' en trois niveaux structuraux (figures 1 et 2) :

- (1) le 'bri' supérieur consolidé (W<Wp), état solide

- (2) le 'bri' inférieur à fortes teneurs en eau et faibles résistivités, état plastique à pseudo-liquide

- (3) le 'bri' profond qui correspond à une densification du sédiment avec la profondeur.

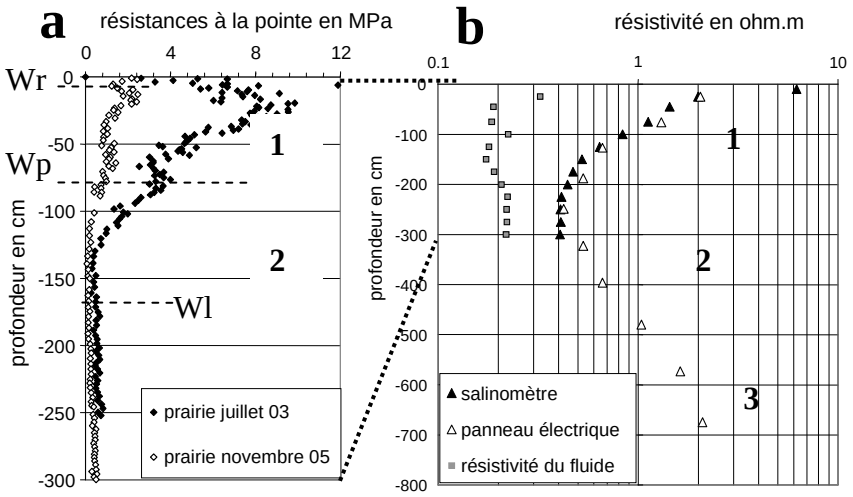

Figure 2. *a- Profils de résistance à la pointe enregistrés à St Laurent de la Prée en juillet 2003 et novembre 2005, b- Profils de résistivité du sol mesurés en novembre 2005 à l'aide du salinomètre et extrait du panneau électrique. Les résistivités de fluides prélevés in situ ont été mesurées en laboratoire.*

Les courbes de retrait déduites de la dessiccation des éprouvettes intactes présentent les quatre domaines définis par Braudeau (1999) (figure 3) :

- le domaine W<18% à indice des vides constant,

-la courbe convexe entre W = 18% et W = 25% (point d'entrée d'air),

-la droite de retrait entre W = 25% et Wp qui se superpose à la droite de retrait mesurée sur la fraction infra 400µm,

-la courbe légèrement concave obtenue pour des teneurs en eau élevées, W >Wp à W voisine de Wl.

Les variations des hauteurs des éprouvettes mesurées au cours de la dessiccation permettent de calculer les variations de volume pour un retrait isotrope. Entre Wr et Wp ces variations de volume calculées correspondent aux variations de volume mesurées : le retrait est caractérisé par un coefficient géométrique de retrait isotrope,

r = 3 (Chertkov et al., 2004). Ce coefficient géométrique de retrait (r) est défini comme suit, avec v le volume et z la dimension verticale :

$$1 - \frac{\Delta v}{v} = \left[1 - \frac{\Delta z}{z} \right]^r$$

A l'inverse, pour des profondeurs correspondant à des teneurs en eau > Wp, l'état plastique à pseudo-liquide du matériau limite les variations volumiques au seul tassement; le coefficient géométrique de retrait r est égal à 1 (figures 2 et 3).

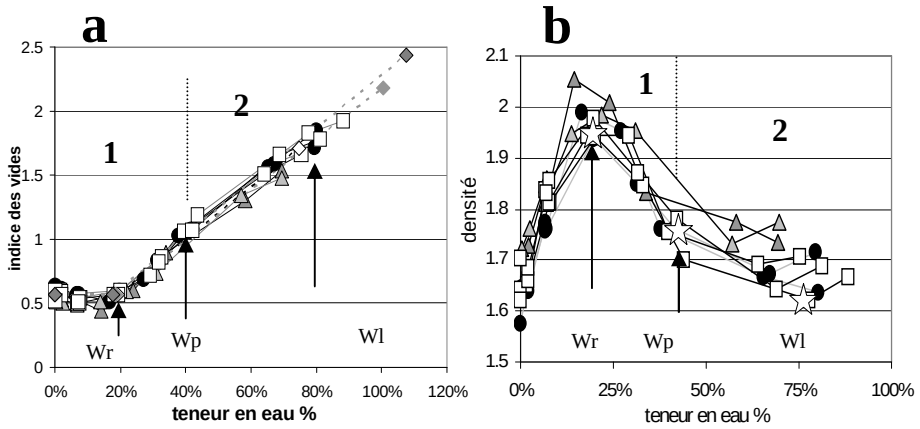

Figure 3. *a- Courbes de retrait mesurées sur échantillons intacts prélevés à 1,96 m (carrés blancs),1,72 m (ronds noirs) et 1,55 m (triangles gris) et courbes de retrait sur le passant à 400 µm (losanges) b- courbes de densité apparente mesurée sur échantillons intacts prélevés à 1,96 m (carrés blancs),1,72 m (ronds noirs) et 1,55 m (triangles gris), 1=domaine de retrait du 'bri' supérieur à l'état solide, r= 3 ; 2=domaine de tassement du 'bri' inférieur, état plastique, r=1.*

Deux séries d'essais de compressibilité à l'oedomètre ont été effectuées (1) dans le 'bri' supérieur (état solide) et (2) dans le 'bri' inférieur (état plastique). Les charges ont été cumulées jusqu'à 400 kPa (tableau 1).

Dans le 'bri' supérieur, la contrainte de préconsolidation augmente prés de la surface en suivant la diminution d'indice des vides. Dans le 'bri' inférieur, les pressions de préconsolidation ne montrent pas de variation significative. L'indice des vides et la pression effective augmentent avec la profondeur.

sites	prof. (cm)	e initial	e final	Cs	Cc	σ'_p (kPa)	σ (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	Φ	W
St Laurent	10	0.85	0.42	0.09	0.28	45	17	17	0.46	32%
prairie	25	0.9	0.48	0.10	0.23	40	43	43	0.47	34%
	45	1	0.52	0.08	0.29	32	77	77	0.50	37%
Maillezais	70	1	0.67	0.08	0.35	65	114	104	0.50	37%
	100	1.34	0.87	0.14	0.38	65	162	122	0.57	48%
	120	1.72	1.37	0.13	0.56	65	195	135	0.63	66%

Tableau 1. *Récapitulatif des résultats d'essais oedomètriques. Cs = indice de recompression, Cc = indice de compression,* σ'_p *= contrainte de préconsolidation,* σ *= pression des terres,* σ'_{vo} *= pression effective verticale, e = indice des vides,* Φ *= porosité, W = teneur en eau.*

4. Discussion

Par rapport à un sondage électrique, le couplage pénétromètre – salinomètre permet d'établir des profils de résistivités réelles / profondeurs réelles. Corrélés aux profils de densité apparente, de teneur en eau et de porosité, ces profils de résistivité ont permis d'étalonner la loi d'Archie dans le 'bri'. Les profils de résistivité mesurés au salinomètre se superposent parfaitement aux profils extraits des panneaux électriques. Dans ces conditions ces profils, limités à une profondeur de 3.00 m sur les sites étudiés, peuvent être prolongés en profondeur par l'intermédiaire des panneaux électriques (figure 2). La loi d'Archie permet alors de reconstruire les profils de porosité.

L'évolution de structure du 'bri' supérieur à l'état solide (profondeur < Wp) puis 'bri' inférieur plastique à « pseudoliquide » (W>Wp à W>Wl) traduit le phénomène de dessiccation de surface et la consolidation associée. La dessiccation qui opère dans le 'bri' supérieur entraîne consolidation et retrait isotrope en 3 dimensions (r=3). Le phénomène se traduit par une fissuration et un tassement. Il se mesure également par l'augmentation de la contrainte de préconsolidation en surface. Dans le 'bri' inférieur, la baisse de teneur en eau associée à une « remontée » vers la surface, opère en milieu saturé (W>Wp), seul le phénomène de tassement est mesurable.

Les panneaux électriques, du fait de l'investigation plus profonde, complétés par l'étalonnage de la loi d'Archie, montrent le troisième niveau structural du 'bri' en profondeur ; fermeture de la porosité conséquente à la densification (consolidation) du matériau argileux en profondeur ('bri' profond).

Le sédiment présente une évolution verticale de porosité et de contrainte de préconsolidation en désaccord avec le modèle de comportement classique des sols décrit par Terzaghi (1943). Dans notre cas les résultats oedomètriques révèlent l'état sous-consolidé du sédiment caractéristique des matériaux vaseux. La structure du sédiment est gouvernée par le mécanisme de dessiccation en surface et le mécanisme

de sédimentation - densification en profondeur : la contrainte de préconsolidation est supérieure à la pression effective pour les profondeurs inférieures à la profondeur de Wp, à l'inverse, la pression effective est supérieure à la contrainte de préconsolidation sous la profondeur de Wp.

Bibliographie

Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. 146, 54-62

Bernard M., Dudoignon P. et Pellerin F.M., 2005. Caractérisation de la structure des sols de marais par couplage pénétromètre/résistivimètre. Colloque GEOFCAN Géophysique des Sols et des Formations Superficielles. 20621 septembre 2005 Orléans. Actes p 15-18

Bernard M., Dudoignon P., Pons Y. , Chevallier C., 2006. Representation of the structural characteristics of clay dominant soils of mars hand paleosol in a (e-Qd-W-Sr) crossed diagram. Ss presse *Eur. J. Soil. Sci.*

Braudeau, E., Costantini, J.M., Bellier, G. & Colleuille, H., 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 525-535.

Chertkov V.Y., RavinaI.I et Zadoenko V., 2004. An approach for estimating the shrinkage geometry factor at a moisture content. Soil Sci. Soc. Am..J. 68 : 1807-1817

Hallaire V., Azib M., Curmi P. et Cheverry C., 1996 Physical and chemical variations within prisms of a saline polder clay in relation to seasonal changes. European Journal of Soil Science, 47, 463-471

Pons Y., Capillon A., et Cheverry C., 2000 Water movement and stability of profiles in drained, clayey and swelling soils : at saturation, the structural stability determines the profile porosity. Europ. J. Agronomy 12, 269-279

Salem H.S. et Chilingarian G.V., 1999 The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs. J. Pet. Sci. Eng. 23, 83-93.

Terzaghi K., 1943 Theoretical Soil Mechanics, New-York, John Wiley & Sons, 51 p.