
Corrélation profils de résistance à la pointe – profils de teneur en eau dans les sols argileux : Marais de Rochefort.

BERNARD Marjorie, DUDOIGNON Patrick

ESIP, UMR 6532 du CNRS, 40, av. du recteur Pineau, 86000 Poitiers
marjorie.bernard@etu.univ-poitiers.fr
patrick.dudoignon@esip.univ-poitiers.fr

RÉSUMÉ. Les profils de résistances à la pointe (Q_d) enregistrés au pénétromètre dynamique léger PANDA entre juillet 2003 et novembre 2005 dans le bri du marais de Rochefort montrent des diminutions de résistance avec la profondeur en accord avec les augmentations parallèles de teneur en eau (w). Le domaine de teneur en eau investi s'étend de la limite de retrait à limite de liquidité. Les relations structure – résistance sont présentées dans un diagramme croisé $w - e$ (indice des vides) – $Q_d - \gamma_d$ (densité sèche). Chaque profil de Q_d peut être relié aux profils de teneur en eau ou d'indice des vides associés par une équation de Perdok modifiée. Réciproquement tout profil de teneur en eau peut être reconstruit à partir du profil de Q_d et de quatre couples ($w - Q_d$).

ABSTRACT. Cone resistance (Q_d) profiles were recorded in the Rochefort Marsh from July 2003 to November 2005. They show parallel Q_d decrease and water content (w) increase with depth. In the shrinkage limit (w_R) – liquidity limit (w_L) domain the structural versus resistance relation are shown in a $w - e$ (void ratio) – $Q_d - \gamma_d$ (dry density) crossed diagram. Each Q_d profile is linked with its associated w profile using modified Perdok's equation. Reciprocally each w profile can be calculated from the measured Q_d profile with only four ($Q_d - w$) couples.

MOTS-CLÉS : sols argileux, pénétromètre, courbe de retrait, équation de Perdok.

KEYWORDS: clay-rich soils, penetrometer, shrinkage curve, Perdok's equation.

1. Introduction

Les pénétromètres dynamiques légers sont fréquemment utilisés pour les reconnaissances de terrains et les contrôles de compactages de remblais. Pour ces derniers, les contrôles de qualité nécessitent un calibrage par rapport aux courbes de densité de l'essai Proctor (XP P 94-105). Dans le cas de reconnaissances de formations superficielles, les variations verticales de résistance à la pointe permettent de différencier des horizons ou des formations sans mesures réelles de la structure interne. Pourtant les pénétromètres portables type PANDA sont particulièrement bien adaptés à la prospection des formations superficielles et des sols de marais (Maquaire *et al.*, 2002, Bernard, 2006 ; Bernard *et al.*, 2007a).

Dans le cas de formations superficielles argileuses, les évolutions de structure du matériau face au phénomène de dessiccation mais également face au tassement sont gouvernées par l'arrangement des particules argileuses. Le comportement structural du matériau argileux est souvent représenté par sa courbe de retrait (Braudeau *et al.*, 2004).

Les sols de marais ont une caractéristique intéressante qui facilite l'étude en parallèle de la structure et des propriétés mécaniques : ils présentent des profils de teneur en eau qui varient de la limite de retrait (w_R) en surface (consolidation par dessiccation et subsidence) à la limite de liquidité (w_L) ou plus en profondeur. Les relations structure / résistance à la pointe ont déjà été présentées dans un diagramme croisé w (teneur en eau) – e (indice des vides) – Sat (indice de saturation) – Q_d (résistance à la pointe) (Bernard, 2006 ; Bernard *et al.* 2007). Plus de soixante profils de résistance à la pointe ont été enregistrés dans le bri du Marais de Rochefort et du Marais Poitevin. Dans des diagrammes croisés $w - e - Q_d$ tous les profils de w s'alignent sur la même courbe de retrait. Dans le diagramme $e - Q_d$ tous les profils de Q_d constituent des courbes de formes hyperboliques similaires.

L'objectif de ce travail est de formuler par un même type d'équation les relations teneur en eau – résistance à la pointe et de reconstruire les profils de teneur en eau à partir des essais pénétrométriques de type PANDA.

2. Matériel et méthodes

Les investigations ont été menées sur le site expérimental de l'INRA de St Laurent de la Prée (Marais de Rochefort). Deux parcelles ont été étudiées, une en prairie depuis 1963 et l'autre cultivée en tournesol pour l'année 2003. Les mesures ont été limitées à juillet et septembre 2003 dans la parcelle en tournesol. Elles ont été effectuées en juillet 2003, janvier, mars, mai et novembre 2004, janvier et novembre 2005 dans la parcelle en prairie de manière à suivre les évolutions saisonnières. Les sols étudiés se sont formés par consolidation et maturation des sédiments

quaternaires (Bri) déposés lors de la transgression Flandrienne. Ils sont émergés depuis au moins le X^{ème} siècle (Debord, 1978). Le Bri est caractérisé par une texture et une minéralogie homogène. Les fractions $< 20 \mu\text{m}$ et $< 5 \mu\text{m}$ constituent respectivement 90 – 95 % et 55 – 70% du matériau. La fraction fine est constituée d'un assemblage d'illite, de kaolinite, de smectite et d'interstratifiés illite/smectite (Morizet, 1970 ; Bernard, 2006). Les profils de résistance à la pointe obtenus à l'aide d'un pénétromètre PANDA sont couplés avec des carottages d'échantillons intacts jusqu'à des profondeurs de 3 m environ permettant l'établissement des profils de teneur en eau et de densité humide. Les teneurs en eau sont mesurées après séchage à 105°C, les densités humides sont déterminées par double pesée hydrostatique (AFNOR, 1993a). En parallèle, la densité moyenne des grains solides (γ_s) a été déterminée au pycnomètre. Celle-ci vaut $2,58 \text{ g.cm}^{-3}$. Les limites d'Atterberg ont été mesurées suivant la norme AFNOR (1993b). Les limites de retrait, de plasticité et de liquidité valent respectivement 20%, 40% et 75%. A partir de ces données, la porosité, l'indice des vides et la densité sèche ont été calculés pour chaque « point » de mesure.

3. Résultats

Tous les profils de résistance à la pointe montrent la même évolution (figure 2):

- un pic de consolidation de surface marqué en saison sèche et plus atténué en saison humide. Les maximums sont localisés autour de 25 – 30 cm de profondeur. Les valeurs maximums (12 MPa) sont obtenues en été et correspondent à l'intensification du phénomène de retrait du à la dessiccation de surface. Ce pic de surface est parfois doublé vers 70 – 80 cm de profondeur.
- une décroissance avec la profondeur jusqu'à des valeurs très faibles ($< 0.5 \text{ MPa}$) à partir de 120 cm de profondeur.

Les profils de teneur en eau et de densité montrent une parfaite symétrie :

- diminution de densité avec la profondeur
- augmentation de la teneur en eau avec la profondeur : de la limite de retrait en surface (saison sèche) à la limite de plasticité à 70 cm de profondeur et à la limite de liquidité à 120 - 150 cm de profondeur.

Le pic secondaire localisé vers 70 - 80 cm correspond à la profondeur équivalente à la limite de plasticité du sol argileux (Figure 2). Le niveau de nappe est stabilisé vers 80 – 90 cm de profondeur en prairie. L'évolution verticale des teneurs en eau de w_R à plus de w_L permet de recouvrir un domaine d'indice des vides de 0.5 à 2.5. Les valeurs de e équivalentes aux limites de retrait, plasticité et liquidité sont respectivement de 0.5, 1.0 et 2.0. Dans ce domaine les évolutions de structure du sol (et du sédiment) peuvent être représentées dans le diagramme croisé $Q_d - e - w - \gamma_d$ (Figure1).

Dans les diagrammes e / w tous les profils de teneur en eau s'alignent sur la courbe de retrait du matériau. La limite de retrait correspond à la cassure de la

courbe. Dans le diagramme w / γ_d , la densité sèche est reliée à la teneur en eau et à la densité humide γ_h par l'équation [1].

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} \quad [1]$$

Les valeurs de densité sèche calculées sont cohérentes avec les variations de teneur en eau et correspondent à la diminution de porosité équivalente à la perte d'eau en milieu saturé. Cette évolution verticale de structure est confirmée par les observations au microscope électronique à balayage d'échantillons dont la structure hydratée a été conservée par lyophilisation. Le sédiment à la limite de liquidité est caractérisé par l'assemblage en « nid d'abeille » des particules argileuses (Dudoignon *et al.* 2007). La stabilité de cette structure est assurée par les attractions bord-bord des phyllites argileuses (Velde, 1996). Cette structure initiale du sédiment permet de maintenir des porosités importantes et donc des teneurs en eau associées qui évoluent de w_R à plus de w_L .

Parallèlement dans le diagramme $e - Qd$ tous les profils de Qd s'alignent sur des « courbes hyperboliques » dont les formes et les positions évoluent des profils de saison sèche à ceux de saison humide (Bernard *et al.*, 2007b) (figure 1). A partir d'essais en laboratoire Perdok *et al.* en 2002, ont exprimé la résistance à la pointe en fonction de la porosité et la teneur en eau pour des matériaux argileux, limoneux et sableux. Cette relation a été établie pour des teneurs en eau variant de 9 à 20%. Cette équation est de type:

$$\log(Qd) = a_0 + a_1\phi + w(a_2 + a_3\phi) \quad [2]$$

avec w la teneur en eau et ϕ la porosité.

Les coefficients a_0 , a_1 , a_2 et a_3 dépendent de la nature et de la structure du matériau. Quel que soit le profil de résistance à la pointe considéré, il existe une équation modifiée de type Perdok *et al.* (2002) qui permet de décrire les courbes e / Qd :

$$\log(Qd) = a_0 + a_1 \frac{e}{1+e} + w(a_2 + a_3 \frac{e}{1+e}) \quad [3]$$

avec e l'indice des vides.

L'ensemble des profils mesurés in situ se localisent sur le graphique entre les deux profils limites de saison humide (sh) et de saison sèche (ss) (figure 1). Les paramètres a_0 , a_1 , a_2 et a_3 sont choisis tels que la somme des valeurs absolues des différences entre les points mesurés et calculés soit minimale. Ainsi les coefficients ont pu être déterminés pour les profils limites et le profil moyen. Les variations saisonnières observées sur les courbes e / Qd se répercutent sur les équations des courbes de Perdok (tableau 1).

	saison sèche	saison humide	Courbe moyenne
a_0	2.11	2.28	2.34
a_1	- 2.76	- 5.36	- 5.20
a_2	0.11	0.42	0.74
a_3	- 1.19	0.19	0.34

Tableau 1. Valeurs des paramètres a_0 , a_1 , a_2 et a_3 déterminées pour nos profils mesurés à différentes saisons sur le site de St Laurent de la Prée. L'écart moyen entre les valeurs de Q_d mesurées et les valeurs de Q_d estimées par les équations modifiées de Perdok est de 0,25 MPa pour la saison sèche et de 0,32 MPa pour la saison humide.

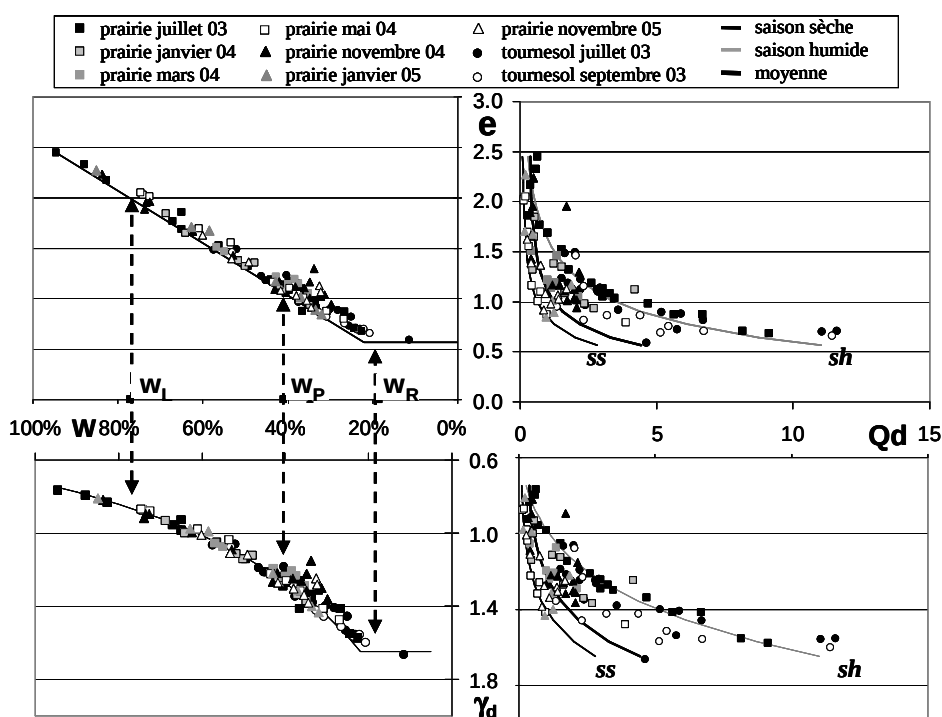


Figure 1. Représentation des profils de mesures de w , e , Q_d et γ_d réalisés à St Laurent de la Prée à différentes saisons dans le diagramme croisé $w - e - Q_d - \gamma_d$.

L'intérêt de mettre en équation la relation teneur en eau / indice des vides et résistance à la pointe est de permettre de retrouver un profil « structural » à partir d'un profil de mesure mécanique ou réciproquement. Quelles sont les conditions

nécessaires à la détermination de la relation de Perdok reliant w , e (ou ϕ) et Qd de façon unique ?

La porosité est liée à la teneur en eau et à l'indice de saturation (Sat) par:

$$\phi = \frac{w\gamma_s}{w\gamma_s + Sat} \quad [4]$$

Si l'on se place dans le domaine saturé ($w > w_R$), l'équation 4 devient :

$$\log(Qd) = a_0 + a_1 \frac{\gamma_s w}{1 + \gamma_s w} + w(a_2 + a_3 \frac{\gamma_s w^2}{1 + \gamma_s w}) \quad [5]$$

Soit la fonction

$$f(w) = a_0 + a_1 \frac{\gamma_s w}{1 + \gamma_s w} + w(a_2 + a_3 \frac{\gamma_s w^2}{1 + \gamma_s w}) \quad [6]$$

La dérivée cinquième de cette fonction est :

$$g(w) = 120\gamma_s^4 * [\frac{-a_3}{(1 + \gamma_s w)^4} + \gamma_s \frac{a_1 + 2a_3 w}{(1 + \gamma_s w)^5} - \gamma_s^2 \frac{a_1 w + a_3 w}{(1 + \gamma_s w)^6}] \quad [7]$$

La fonction $f(w)$ est donc continument dérivable à l'ordre 4 sur $\mathbb{R}^+$. Cette fonction possède 4 paramètres donc 4 degrés de liberté. Les valeurs des quatre dérivées successives en quatre couples de données (w_i , Qd_i) permettent de trouver quatre relations indépendantes. Ainsi, quatre couples de valeurs (w , Qd) suffisent à déterminer les coefficients a_0 , a_1 , a_2 et a_3 de l'équation de façon unique et permettent donc d'établir la relation $Qd - e - w$ valable sur l'ensemble du profil de mesures. Ainsi, il est possible de reconstruire un profil de w à partir d'un profil de Qd en domaine saturé (Figure 2).

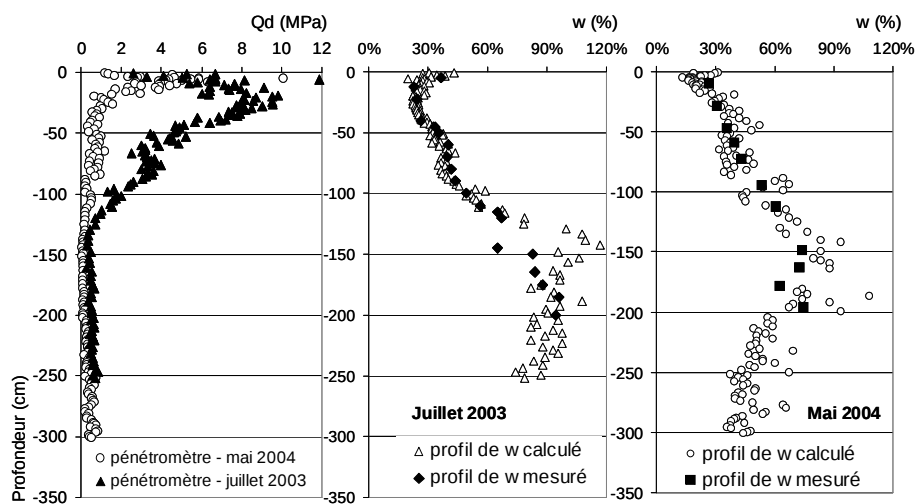


Figure 2. Représentation des profils de résistance à la pointe (Q_d) mesurés en juillet 2003 et mai 2004 et des profils de teneur en eau (w) associés (figurés noirs = profils mesurés, figurés blancs = profil calculés à partir de quatre couples mesurés w - Q).

Les deux profils de w reconstitués à partir de quatre couples W - Q_d sont ceux de juillet 2003 et mai 2004. Ils correspondent aux profils de saison sèche et de saison humide qui encadrent les évolutions saisonnières. Les profils de w calculés sont cohérents avec les profils mesurés jusqu'aux profondeurs de 1.20 – 1.30 m. Dans les deux profils de Q_d associés, ces profondeurs correspondent à la limite inférieure de mesure de résistance à la pointe ($Q_d = 0.5$ MPa). De fait la forme asymptotique des équations de Perdok parallèle à l'axe des indices des vides associée aux variations des très faibles valeurs de Q_d dans ce domaine à l'état pseudoliquide provoque des divergences de calcul de w . Néanmoins les formes générales des profils de teneurs en eau sont respectées.

5. Conclusion

Le pénétromètre dynamique léger est parfaitement adapté à la reconnaissance dans des formations meubles et tout particulièrement aux sols de marais du fait de sa facilité d'emploi à travers des parcelles difficilement accessibles et de sa précision de mesures tant en valeurs de résistances de pointe que de profondeurs. Toutefois aucune relation simple ne permettait de relier la structure du sol et l'évolution de la résistance à la pointe. Cette relation peut être calquée sur l'équation déterminée par Perdok *et al.*. Cette équation fait intervenir quatre coefficients a_0 , a_1 , a_2 et a_3 à déterminer. L'étude mathématique de cette équation a permis d'établir le fait que

quatre couples ($w - Q_d$ ou $e - Q_d$) sont nécessaires pour déterminer de façon unique ces coefficients et ainsi décrire les courbes $w-Q_d$ ou $e-Q_d$ ou permettre de reconstruire un profil de teneur en eau à partir d'un profil de résistance à la pointe. La reconstruction des profils de teneurs en eau à partir des profils de Q_d est tout à fait raisonnable dans le domaine $w_L - w_R$.

Bibliographie

- AFNOR standard. 1993 a. Sols : reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique
- AFNOR standard. 1993 b. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.
- Bernard M., 2006. Etude des comportements des Sols de Marais : Evolution Minéralogique, Structurale et Hydromécanique (Marais de Rochefort et Marais Poitevin). Thèse de l'Université de Poitiers, Spécialité Géosciences, 306 p.
- Bernard M., Dudoignon P., Pons Y. and Chevallier C., 2007. Structural characteristics of clay-dominated soils of a marsh and a palaeosol in a crossed diagram. *European Journal of Soil Science* – ss presse.
- Braudeau E., Frangy J-P., et Mohtar R. H. 2004. Characterizing nonrigid aggregated soil-water shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 525-535
- Debord A., 1978. La société laïque dans les pays de la Charente (X^e – XII^e siècles), Thèse dactylographiée, Université de Nancy, Tome 1.
- Dudoignon P., Causseque S., Bernard M., Hallaire V. et pons Y., 2007. Vertical porosity profile of a clay-rich marsh soil ; ss presse Catena
- Morizet J., Dejou, J. et Guyot J. 1970. Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de type vertique et sodique dans le marais rochefortais à St-Laurent-de-la-Prée (Charente Maritime), *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol*, n°5, 11-24.
- Maquaire O., Ritzenthaler A., Fabre D., Ambroise B. Thiery, Y. Truchet E., Malet J.-P. et Monnet J., 2002. Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France): *Comptes Rendus Géosciences*, 334 (11): 835-841.
- Perdok U. D., Kroesbergen B. et W. B. Hoogmoed, 2002. Possibilities for modelling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. *Soil and Tillage Research*, 65: 61-75.
- XP P 94-105, 2000. Sols : Reconnaissance et essais. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable – Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre – Exploitation des résultats – Interprétation.
- Velde B., 1996. Compaction trends of clay-rich deep sediments. *Marine Geology* 133, 193-201.