



**HAL**  
open science

## Microstructure-conductivité hydraulique dans les matériaux argileux.

Patrick Dudoignon, Jonathan Gallier, Marjorie Bernard-Ubertosi, B. Rekik,  
J.M. Hillaireau

► **To cite this version:**

Patrick Dudoignon, Jonathan Gallier, Marjorie Bernard-Ubertosi, B. Rekik, J.M. Hillaireau. Microstructure-conductivité hydraulique dans les matériaux argileux.. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390979

**HAL Id: hal-03390979**

**<https://hal.science/hal-03390979>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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.

# Microstructure – conductivité hydraulique – essais mécaniques *in situ* dans les matériaux argileux.

P. DUDOIGNON<sup>a</sup>, J. GALLIER<sup>a</sup>, M. BERNARD-UBERTOZZI<sup>b</sup>, B. REKIK<sup>a</sup>, J.M. HILLAIROU<sup>c</sup>

a. FRE HydrASA 3114, Ecole Supérieur d'Ingénieurs de Poitiers, 40, Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex

b. Département Agronomie et Environnement ENESAD 26 Bd Docteur Petitjean BP 87999-21 079 Dijon

## Résumé :

*La comparaison entre les conductivités hydrauliques mesurées sur matrices argileuses saturées et calculées via les équations de Kozeny-Carman montre que ces dernières sont réalistes dans le domaine d'état solide du matériau mais sous-estimées dans le domaine d'état plastique. Dans un premier temps les relations microstructures – conductivité hydraulique(K) sont représentées et discutées pour les chemins de compressibilité dans le diagramme de Cam Clay,  $e$  (indice des vides) -  $\log p$  (pression moyenne), associé au diagramme indice des vides -  $K$ . Dans un deuxième temps les relations structure – conductivité hydrauliques et propriétés mécaniques du sol argileux sont discutées dans un diagramme croisé  $e$ - $W$ - $K$ - $Q_d$  (résistance pénétrométrique) et  $C$  (cohésion du sol).*

## Abstract :

*The comparison between hydraulic conductivities measured on saturated clay matrices and hydraulic conductivities calculated via Kozeny-Carman equation shows realistic superimposition in the solid state domain of the material but a large increase of the measured values in the plastic and « liquid » state domains. Firstly the microstructure – hydraulic conductivities relation ship is demonstrated in a  $W$  (water content) –  $e$  (void ratio) –  $K$  (hydraulic conductivity) crossed diagrams. Secondly the structure-hydraulic conductivity-mechanical properties of a clay dominant soil are discussed in a  $e$ - $W$ - $K$ - $Q_d$  (cone resistance) and  $C$  (shear stress) crossed diagram.*

**Mots clefs :** argile, microstructure, courbe de retrait, chemin d'état, conductivité hydraulique, essais *in situ*

## 1 Introduction

Les évolutions de microstructure dans les matériaux argileux gouvernent leurs propriétés hydromécaniques tant du point de vue des mécanismes d'endommagement que du point de vue conductivité hydraulique. Les conséquences sont évidentes aussi bien en mécanique des sols qu'en agronomie par rapport aux pratiques culturales et croissance des plantes. Le comportement mécanique du matériau est couramment représenté dans un diagramme de type Cam Clay ( $e - \log p$ ) avec  $p$  la pression moyenne appliquée. La courbe de retrait du matériau argileux est couramment représentée dans le diagramme teneur en eau – indice des vides ( $W$ - $e$ ) [1, 2]. Les évolutions des chemins d'état d'un sol argileux sont similaires lorsque le sol est soumis à des contraintes mécaniques ou hydriques. L'équivalence des chemins d'état a été montrée dans un diagramme croisé  $W$ - $e$ - Sat –  $pF$  ou  $\log p$  [3]. Le travail présenté ici est basé sur des études d'évolution de microstructure de matériaux argileux consolidés et cisailés à la presse triaxiale [4] et sur des études d'évolution *in situ* de structures de sols argileux en relation avec leurs propriétés hydromécaniques (résistance pénétrométrique, cohésion, conductivité hydraulique) [5] [6] [7] [8]. L'objectif est de relier les propriétés mécaniques du

matériau argileux à ses caractéristiques structurales via les conductivités hydrauliques.

## 2 Matériaux et méthodes

Des éprouvettes consolidées et cisailées à la presse triaxiale (diamètre 35 mm, élancement 2) ont été confectionnées par mélange de kaolinite (Prolabo) et eau ramené par dessiccation à une teneur en eau de 50% et masse volumique sèche de 11.7 kN/m<sup>3</sup>. Chronologiquement les essais ont consisté en (1) une consolidation hydrostatique et isotrope à 100, 300, 400 et 600 kPa puis (2) en un cisaillement de ces éprouvettes soit simplement consolidées ( $\rho_{\text{cons}} = \rho_{\text{sci}}$ ), soit surconsolidées ( $\rho_{\text{cons}} = 600$  kPa,  $\rho_{\text{sci}} = 300, 200$  et 100 kPa ;  $\rho_{\text{cons}} = 300$  kPa,  $\rho_{\text{sci}} = 200$  et 100 kPa). Le matériel kaolinitique est caractérisé par une limite de plasticité ( $W_p$ ) de 38% et une limite de liquidité ( $W_l$ ) de 54%. Les fractions granulaires < 2  $\mu\text{m}$ , 2-20  $\mu\text{m}$  et > 20  $\mu\text{m}$  sont respectivement de 54,5%, 40,8 % et 4,7 % ; 95 % du matériau est inférieur à 20 $\mu\text{m}$ . Les chemins d'état sont représentés dans un diagramme de Cam-Clay (e-log p). Les conductivités hydrauliques du matériau le long de ces chemins d'état ont été calculées en utilisant une équation de Kozeny-Carman ( $K_{\text{kc}}$ ) capable de prendre en compte les paramètres d'arrangement particulaire au sein des matrices via la mesure de tortuosité [9] [10] [Eq.1]:

$$K_{\text{kc}} = [1/(2T^2)][n^3/S_{\text{sp}}^2] \quad [\text{Eq.1}]$$

avec T la tortuosité, n la porosité,  $S_{\text{sp}} = S(1-n)$  et S = aire surfacique des particules (surface des particules / volume des particules).

Les caractéristiques d'arrangement des particules argileuses au sein des éprouvettes ont été mesurées par couplage d'observation en microscopie optique (lumière polarisée et analysée) de lames minces et analyse d'images basée sur les propriétés de biréfringence des particules. Les lames minces ont été confectionnées après induration du matériau. Les fractions d'arrangement isotrope ou anisotrope des particules sont obtenues par décomposition des diagrammes de niveau de gris pour les différents microsites observés en position d'éclairement maximum et en position d'extinction [11]. Les évolutions de porosité ou indices des vides sont mesurées à l'échelle des microsites par microanalyses chimiques couplées à l'observation MEB sur les lames minces [12]. Finalement le réarrangement des particules peut être associé au chemin d'état dans le diagramme e-log [4].

Les investigations *in situ* et en laboratoire sur sols ont été effectuées sur le site expérimental de l'INRA de St Laurent de la Prée. Les sols étudiés proviennent de la dessiccation et maturation de sédiments fluviomarins quaternaires (Bri) qui résultent des cycles dessiccation humidification saisonniers et des épisodes de poldérisation qui ont commencé au Moyen Age. Ce sont des sols fins très argileux à plus de 85% de particules infra 20 $\mu\text{m}$  et constitués essentiellement d'assemblages kaolinite – illite – interstratifiés illite/smectites [13]. Les limites de retrait, de plasticité et de liquidité du matériau prélevé à St Laurent de la Prée sont respectivement 20%, 40% et 70%.

Etudiés dans des parcelles en prairies depuis 1962 ces sols présentent des profils hydriques particuliers (**figure 1**):

- de la surface à 70 cm de profondeur des teneurs en eau qui évoluent entre les saisons mais qui restent comprises entre  $W_r$  et  $W_p$ . Le matériau y est à l'état solide et fracturé. La prismation induite par la fracturation s'arrête à 70 cm de profondeur, au niveau de  $W_p$ .
- de 70 cm à 300 cm de profondeur les profils de teneur en eau sont constants à travers les saisons, les teneurs en eau évoluent de  $W_p$  à 70 cm de profondeur jusqu'à des valeurs supérieures à  $W_l$  en profondeur (2-3 m).

Par conséquent, structures et propriétés hydromécaniques du matériau ont été étudiées *in situ*

dans un domaine de teneurs en eau comprises entre 20% ( $W_r$ ) et 100% ( $> W_l$ ). Les profils de teneurs en eau et densités humides mesurées sur échantillons intacts ont permis de comparer les états structuraux du matériau argileux et sa courbe de retrait. La structure du matériau a été étudiée à partir d'analyse d'images de sections polies (9cm\*10 cm) après induration par échange eau-acétone-résine et par observation au MEB de blocs millimétriques à centimétriques lyophilisés. Les conductivités hydrauliques associées aux évolutions de structure ont été calculées ( $K_{kc}$ ) via la loi de Kozeni-Carman [Eq.1] puis comparées à des conductivités hydrauliques mesurées via des essais de compressibilité à l'oedomètre ( $K_{oe}$ ).

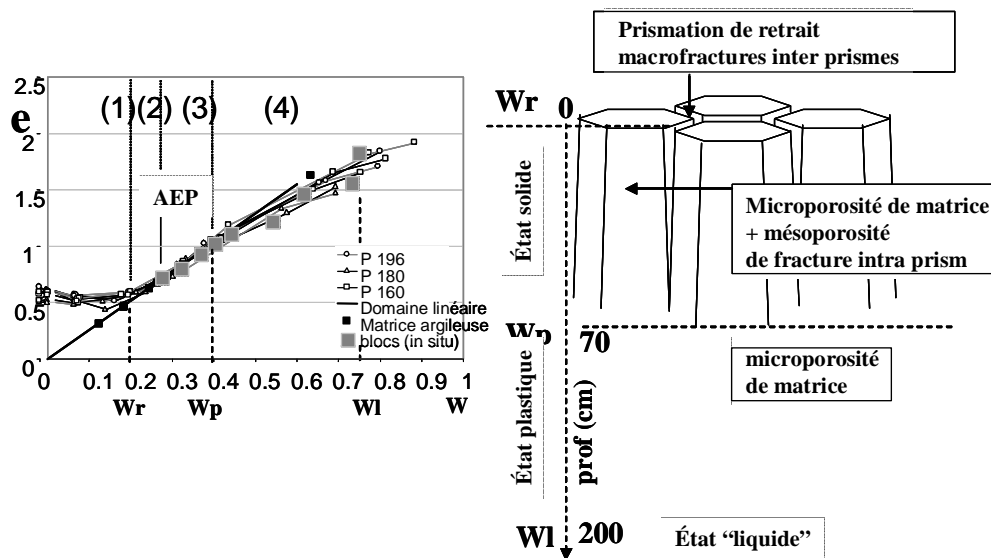


Figure 1 : Relation courbe de retrait – profil structural in situ.  $W_r$ ,  $W_p$  et  $W_l$  = limites de retrait, plasticité et liquidité.  $e$  = indice des vides. AEP = Point d'entrée d'air. P 196, 180 et 160 = profondeur des échantillons initiaux. Carrés noirs Matrice argileuse = indice des vides mesurés par analyse d'image, carrés gris = profil d'échantillons intacts (profil structural).

### 3 Résultats

#### 3.1 Evolutions de structure

De la surface vers la profondeur, les profils de structure montrent la superposition de la couche superficielle à l'état solide ( $W_r < W < W_p$ ) et fracturée sur une couche à l'état plastique ( $W_p < W < W_l$ ) non fracturée puis une couche à l'état « liquide » ( $W_l < W$ ) également non fracturée. En fait le retrait du sol induit fracturation verticale et subsidence dans la couche superficielle. Les évolutions de teneurs en eau dans les niveaux plastique et « liquide » inférieurs induisent uniquement la subsidence sans fracturation. Les profils de teneurs en eau, densités humides et indices des vides sont calculés à partir de mesures sur blocs intra prismes exempts de macrofracturation et ne contenant que quelques microfractures. De fait ces blocs sont caractérisés par seulement une porosité de matrice disséminée entre les particules argileuses. Les profils structuraux mesurés sur ces blocs se superposent parfaitement sur la courbe de retrait du matériau argileux dans une gamme de teneur en eau comprise entre  $W_r$  et  $W_l$  (Figure 1).

#### 3.2 Evolutions de conductivités hydrauliques

En fait, pour un facteur de forme moyen des particules (2-5 ;  $2\mu\text{m}$  en épaisseur –  $5\mu\text{m}$  en diamètre) constant l'arrangement des particules influe sur le calcul de conductivité via la tortuosité et la porosité. Pour un faible indice des vides de 0.5 ( $W_r$ ) la tortuosité évolue de 1.28 pour un arrangement isotrope des particules à 1.80 pour un arrangement anisotrope. Pour des indices des vides supérieurs les variations de tortuosité diminuent. Finalement dans le domaine d'indice des vide 0.5 ( $W_r$ ) – 2 ( $W_l$ ) étudié la porosité est le paramètre le plus influent sur la conductivité hydraulique. Les observations en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage (meb) ont montré un arrangement subsisotrope des particules de l'état plastique à

l'état « liquide »[8]. Les calculs des conductivités hydrauliques ont été simplifiés en considérant une matrice argileuse isotrope tout au long du profil  $W_r$ - $W_l$ . Les valeurs obtenues restent très faibles :  $10^{-11}$  m/s à  $W_r$ ,  $10^{-10}$  m/s à  $W_p$  et  $5 \cdot 10^{-9}$  à  $W_l$ . L'ordre de grandeur de  $10^{-10}$  m/s pour l'état plastique du matériau apparaît très faible face à la microporosité inter particules observée au meb. Les conductivités hydrauliques de ces matrices argileuses saturées mesurées via des essais de compressibilité à l'oedomètre pour des indices des vides et teneurs en eau dans le même domaine  $W_r$ - $W_l$  montrent deux types de comportement (figure 2) :

- dans le domaine solide ( $W_r < W < W_p$ ) les conductivités hydrauliques mesurées ( $K_{oe}$ ) sont cohérentes avec les conductivités calculées ( $K_k$ )
- dans le domaine plastique-liquide ( $W_p < W < W_l$ ) les conductivités hydrauliques mesurées ( $K_{oe}$ ) s'écartent des calculs ( $K_k$ ) avec l'augmentation des indices des vides.

### 3.3 Evolutions des propriétés mécaniques in situ

Les mesures in situ des profils de résistance à la pointe (pénétromètre) et de cohésion (scissomètre) montrent des évolutions similaires qui sont gouvernées par les teneurs en eau et structure des sols. En surface, l'état solide et fracturé, correspond aux pics de consolidation. Les maxima sont mesurés pour les teneurs en eau voisines de  $W_r$  avec des valeurs de  $Q_{d_{max}}$  entre 8 et 10 MPa. Les profils de cohésion montrent des pics de valeurs décalés vers le bas à cause de la fracturation de surface prise en compte lors des mesures de  $C$ . Les maxima sont obtenus pour des teneurs en eau proches de  $W_p$ , les valeurs de  $C_{max}$  sont voisines de 150 kPa.. Les valeurs de  $Q_d$  et  $C$  diminuent avec la profondeur dans les niveaux inférieurs à l'état plastique puis liquide. Les valeurs minimales de  $Q_d$  ( $< 0.5$  Mpa) et les valeurs minimales de  $C$  ( $< 20$  kPa) sont obtenues pour les valeurs de teneurs en eau  $> 80\%$  soit  $> W_l$ .

La superposition des profils structuraux et des courbes de retrait du matériau argileux permettent de représenter les profils de  $Q_d$  et de  $C$  dans des diagrammes croisés de type  $W$ - $e$ - $Q_d$  et  $W$ - $e$ - $C$ . Tous les profils de  $Q_d$  et de  $C$  se présentent sous formes de courbes « hyperboliques » qui montrent deux asymptotes :i.e. une asymptote vers l'axe des indices des vides pour les très faibles valeurs de  $Q_d$  et  $C$  qui correspondent aux plus forts indices des vides et une asymptote des fortes valeurs de  $Q_d$  et  $C$  parallèle aux abscisse  $Q_d$  ou  $C$  pour les faibles indices des vides voisins de 0.5 correspondant à la limite de retrait (Figure 2). Ces courbes hyperboliques de  $Q_d$  et  $C$  peuvent être reliées à la courbe de retrait ( $W$ - $e$ ) via des équations de Perdock de type [14] [7]:

$$\log(Q_d) = a_0 - a_1 \frac{e}{1+e} + W(a_2 + a_3 \frac{e}{1+e}) \text{ et } \log(C) = a_0 - a_1 \frac{e}{1+e} + W(a_2 + a_3 \frac{e}{1+e}) \quad [\text{Eqs.2 et 3}]$$

avec  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  des coefficients calculés de manière à minimiser la somme des valeurs absolues entre valeurs mesurées et calculées. Les courbes de Perdock calculées à partir de l'ensemble des profils  $Q_d$  et  $C$  enregistrés sont (figure 2):

$$\log(Q_d) = 1.74 - 3.71 \frac{e}{1+e} + W(-0.30 + 1.14 \frac{e}{1+e}) \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$\log(C) = 1.48 - 2.76 \frac{e}{1+e} + W(0.43 - 0.93 \frac{e}{1+e}) \quad [\text{Eq. 5}.]$$

La moyenne des valeurs absolues entre  $Q_d$  et  $C$  mesurés et  $Q_d$  et  $C$  calculés (courbes de Perdock) sont respectivement 0.29 et 0.22 MPa.

## 4 Discussion - Conclusion

La comparaison et les relations entre paramètres mesurés ( $W$ ,  $Q_d$ ,  $C$ ,  $K_{oe}$ ) ou calculés ( $e$ ,  $K_{kc}$ ) peuvent être établies en calant les différents profils mesurés sur les courbes de retrait ( $W$ - $e$ ) des matériaux argileux qui

sont indépendantes du chemin de contrainte hydrique ou mécanique suivi. Les relations entre les différents paramètres hydriques et mécaniques peuvent être représentées dans des diagrammes croisés de type W-e-Qd-K ou W-e-C-K. Ces diagrammes montrent que les évolutions structurales du matériau gouvernent les propriétés hydromécaniques (figure 2). A l'état solide (Wr-Wp) le faible degré de liberté des particules argileuses contraint les valeurs de  $K_{oe}$  mesurées sur la courbe théorique  $K_{kc}$  et les évolutions de Qd et C (1 à 4 MPa pour les deux) croissent très rapidement et de manière pratiquement linéaire avec la diminution de W et e. A l'état plastique à liquide (Wp-Wl) l'augmentation importante de porosité et l'arrangement en nid d'abeille des particules argileuses facilitent le réarrangement des particules sous contraintes hydriques et/ou mécanique. Les valeurs de  $K_{oe}$  s'écartent de la courbe théorique de  $K_{kc}$  et suivent une évolution de type  $\log K_{oe} = 19W - 18$  ( $R^2 = 0.96$ ).

Finalement la représentation des profiles dans le diagramme K – Qd et C montre le rôle dominant de la limite de plasticité qui sépare brutalement les comportements hydromécaniques du matériau entre celui caractérisé par un fort degré de liberté des particules qui permet leur réarrangement et l'écoulement de fluide dans la porosité inter-particules et celui d'un matériau solide à faible indice des vides et faible degré de liberté des particules qui correspond à l'état consolidé. Les particules argileuses sont bloquées bord-face ou face-face diminuant drastiquement la conductivité hydraulique  $K_{oe}$ . L'endommagement du matériaux nécessite de vaincre les force de cohésions entre particule et/ou le délaminage des particules elles mêmes au niveau des plans de cisaillement.

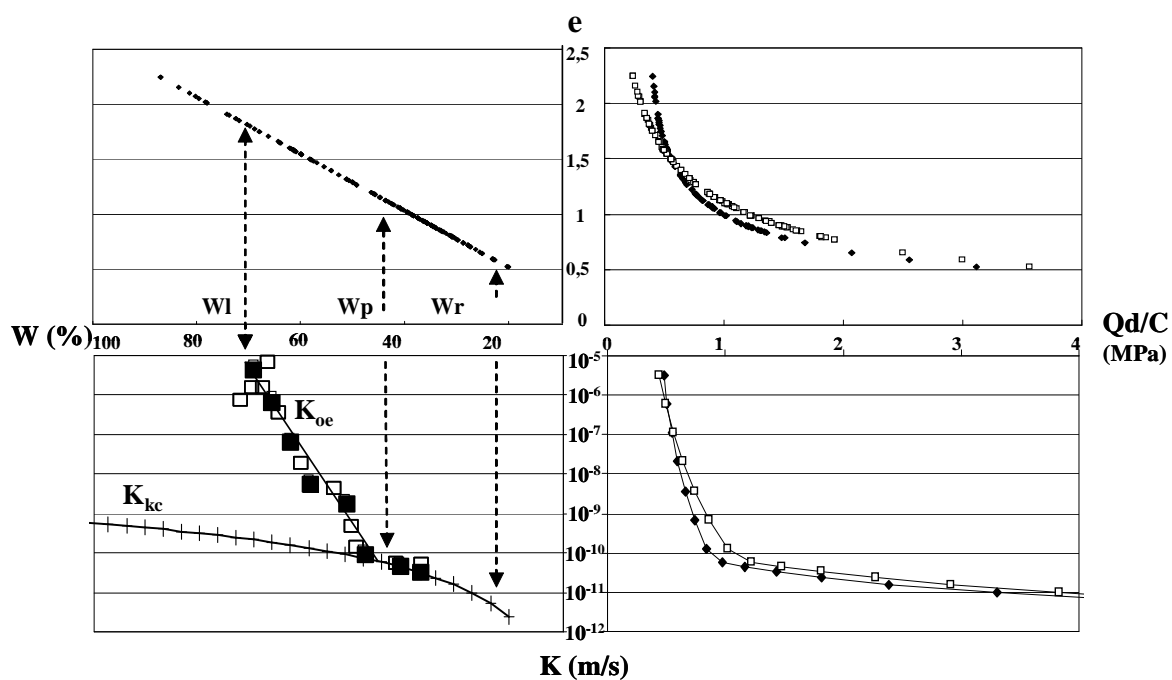


Figure 2 : Représentation schématique du comportement hydromécanique du matériau argileux dans le diagramme croisé teneur en eau (W), indice des vides (e), résistance à la point (Qd) et cohésion (C) mesurées *in situ*, conductivité hydraulique (K).  $K_{oe}$  et  $K_{kc}$  = conductivités hydrauliques respectivement mesurées à l'oedomètre (carrés) et calculée en utilisant l'équation de Kozeny-Carman (croix) [1]. Les courbes de e-Qd (losanges noirs) et e-C (carrés blancs) sont les courbes de Perdock calculées pour l'ensemble des profiles enregistrés *in situ* [Eqs. 4, 5].

## References

- [1] Braudeau E., Equations généralisées des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés, *Compte Rendus de l'Académie des Sciences Paris Série II*, 307, 1933-1936, 1988.
- [2] Tariq A-R., Durnford D.S., Analytical volume change model for swelling clay soils. *Soil Sci. Soc. Am., J.* 57 :1183-1187, 1993.
- [3] Biarez J., Fleureau J.-M., Zerhouni M.-I., Soepandji B.S., Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage - humidification, *Revue Française de Géotechnique*, 41, 63-71, 1987.
- [4] Dudoignon P., Gélard D., Sammartino S., Cam-clay and hydraulic conductivity diagram relations in consolidated and sheared clay-matrices. *Clay Minerals*, 39 : 269-279, 2004.
- [5] Bernard M., Dudoignon P., Chevallier C., Pons Y., Shrinkage and subsidence in a marsh soil : measurements and preliminary model, *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1834-1842, 2006
- [6] Bernard M., Dudoignon P., Pons Y., Chevallier C., Boulay L., Structural characteristics of clay-dominated soils of a marsh and a paleosol in a crossed diagram, *European Journal of Soil Science*, *European Journal of Soil Science*; v.58, n°5. 1115 – 1126, 2007.
- [7] Bernard-Ubertozzi M., Dudoignon P., Pons Y., Characterization of structural Profiles in Clay-Rich Marsh Soils by Cone Resistance and Resistivity Measurement. *Soil Science Society of America Journal* (in press), 2009.
- [8] Dudoignon P., Caussègue S., Bernard M., Hallaire V., Pons Y., Vertical porosity profile in a clay-rich marsh soil, *Catena*; 70 (3). 480 – 492, 2007.
- [9] Pantaloni J. Ecoulement de fluide. Ecoulement en milieu poreux, Séminaire « Les procédés de séparation » Comité français de l'électricité, France, 32 p., 1998.
- [10] Grollier J., Fernandez J., Hucher M., Riss J., *Les propriétés physiques des roches, Théories et Modèles*. Masson, Paris, 462 p, 1991.
- [11] Dudoignon P., Pantet A., Measurement and cartography of clay matrix orientations by image analysis and grey-level diagram decomposition. *Clay Miner.* 33, 629 – 642, 1998.
- [12] Dudoignon P., Pantet A., Carrara L., Velde B., Macro-micro measurement of particle arrangement in sheared kaolinitic matrices. *Géotechnique*, 51, 493-499, 2001
- [13] Bernard, M., *Etude des comportements des Sols de Marais : Evolution Minéralogique, Structurale et Hydromécanique*. (Marais de Rochefort et Marais poitevin). Thèse Université de Poitiers 300 p., 2006.
- [14] Perdok, U. D., Kroesbergen, B. ad Hoogmoed, W. B., 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.