

Enregistrement scientifique n° : 981  
Symposium n° : 2  
Présentation : poster

## **Les enseignements des mesures de retrait et gonflement *in situ* d'un Vertisol**

### **The lessons of field shrinkage and swelling measurements in a Vertisol.**

**CABIDOCHÉ Yves-Marie (1), GUILLAUME Patrice (2), OZIER-LAFONTAINE Harry (1), RUY Stéphane (3), VOLTZ Marc (4)**

(1) INRA, Unité APC, BP 515, 97165 Pointe-à-Pitre Cedex, French Antilles

(2) CIRAD-CA, Station de Roujol, 97170 Petit-Bourg, French Antilles

(3) INRA, Unité de Science du Sol, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France

(4) INRA, Laboratoire de Science du Sol, 34060 Montpellier Cedex 1, France

#### **Introduction**

Les sols argileux gonflants ont une matrice argileuse déformable et de faible conductivité hydraulique. Les Vertisols en constituent un pôle extrême : riches en smectites ils se développent dans les zones à saison sèche marquée ou semi-arides, favorables au maintien de la silice et des cations basiques. Leur fertilité chimique est élevée. La principale contrainte à résoudre pour leur mise en valeur est le maintien d'une alimentation en eau équilibrée des cultures. Maîtriser l'eau dans ces sols est délicat pour plusieurs raisons. La faible conductivité hydraulique de la matrice argileuse rend l'eau qu'elle contient peu disponible. En second lieu, la longue saison sèche et l'irrégularité des pluies en saison humide conduisent à un rationnement en eau excessif pour la plupart des plantes cultivées, aggravé par les dégâts au système racinaire que provoque l'ouverture des macro-fissures. L'irrigation, utile lorsque des ressources en eau sont disponibles, est délicate à conduire : le moindre apport en excès induit une asphyxie des racines, et donc un stress hydrique ; cet effet est aggravé par les semelles imperméables en fonds de labours effectués sur un sol trop humide.

D'importants travaux ont été consacrés à l'étude de la dynamique de l'eau dans les sols argileux gonflants. Tous se heurtent aux difficultés à la fois théoriques et métrologiques inhérentes à la déformabilité de ces sols. Les transferts d'eau sont toujours couplés aux mouvements de solide, et non descriptibles par la loi de Darcy. Les macro-fissures interdisent le prélèvement de volumes représentatifs de sol. Elles interdisent aussi l'emploi des techniques de mesures hydriques *in situ* requérant un contact sol-capteur, tensiomètres et humidimètres. Elles sont le siège d'écoulements préférentiels rapides, en contraste avec les transferts lents dans la matrice argileuse. Plusieurs modèles d'écoulements en "by-pass" ont été créés pour rendre compte de deux voies de transfert. Jarvis (1994) considère deux compartiments : les micropores qui correspondent aux pores de la matrice argileuse, et les macropores incluant les fissures de retrait et les macropores présents dans les prismes que délimitent ces fissures. Bronswijk (1988) sépare les écoulements dans les macrofissures des transferts dans les prismes qu'elles délimitent, sans distinguer les micropores des argiles des pores structuraux qu'elles contiennent. Ces modèles rendent correctement compte des transferts observés dans certains sols argileux gonflants de régions tempérées, mais ils sont a priori peu adaptés au cas extrême

des Vertisols, dont la maille horizontale de fissuration approche le mètre et dont la largeur des fissures atteint plusieurs centimètres, lesquelles délimitent des prismes contenant une porosité structurale, de forme principalement tubulaire dans les horizons (B). Cette communication présente une approche du système de porosité d'un Vertisol en trois compartiments (fig.1) : (i) macrofissurales, délimitant des prismes, (ii) structuraux intra-prismes, surtout tubulaires, et (iii) matriciels, définis par le réseau des tactoïdes. Les conséquences de l'existence de ces trois compartiments en termes de transferts d'eau et de disponibilité de l'eau pour les plantes sont analysées, avec sur le plan théorique une proposition de modélisation, et sur le plan pratique une méthode nouvelle de pilotage de l'irrigation dans les Vertisols.

### **Les Vertisols "extrêmes" de la Guadeloupe**

Ils sont issus de l'altération de projections volcaniques andésitiques sur un support de calcaire récifal. Tous les minéraux étant altérables, ces sols contiennent plus de 90% d'argile, dont plus de 70% de beidellite, saturée par le calcium. Sous prairies spontanées de *Dichantium aristatum*, la maille horizontale de fissuration est de tendance hexagonale, de 50 à 70 cm de diamètre, et suit les micro-dépressions d'un relief gilgai normal de 10 cm d'amplitude des ondulations. La largeur des fissures en fin de saison sèche atteint 4 à 6 cm, et leur profondeur 1.2 m. Les variations inter-saisonnières d'altitude de surface peuvent dépasser 0.1 m.

### **Courbe de retrait de prisme et courbe de retrait de sol obtenue par le transducteur d'épaisseur THERESA**

L'établissement de courbes de retrait, outil conçu par Haines (1923) pour être appliqué à des pâtes argileuses, sur des sols argileux naturels a parfois été source de confusions : selon que les prélèvements incluent ou non les macro-fissures, les déformations du sol peuvent apparaître équi- ou unidimensionnelles (Berndt et Coughlan, 1976). Bruand et Prost (1987) ont montré la relation entre la taille des échantillons extraits et la perte de volume apparent en dessiccation dans sols argileux à système de porosité hiérarchisé.

Compte tenu de la taille des prismes des Vertisols de Guadeloupe, il est impossible d'extraire des volumes représentatifs de couches de sol, incluant les macro-fissures. La mesure du volume apparent d'échantillons ne peut concerner que des sous ensembles des prismes. Cette mesure a été effectuée sur des échantillons de 0.2 à 0.5 dm<sup>3</sup> après enrobage à la paraffine ou ensachage sous vide (Cabidoche et Ney, 1987). Le seul moteur de dessiccation étant le prélèvement racinaire (Ritchie et Burnett, 1971), toute dessiccation périphérique au laboratoire produit un retrait résiduel artificiel. Ces échantillons de grande taille ont donc été prélevés à différents états hydriques au champ, au cours d'une saison sèche sans pluie.

La courbe de retrait de couche de sol n'est accessible que par la mesure simultanée de son épaisseur et de sa teneur en eau. Un transducteur d'épaisseur, dénommé THERESA ("Transferts Hydriques Evalués par le REtrait des Sols Argileux") a été mis au point (fig.2), répondant aux spécifications suivantes (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1995): diamètre suffisamment petit pour ne pas provoquer d'amorce de fissuration, ancrage ponctuel face à la variabilité spatiale des teneurs en eau, et respectant l'intégrité des systèmes racinaires. Les teneurs en eau ont été mesurées sur échantillons extraits à la tarière. Le protocole d'échantillonnage spatial (Cabidoche et Voltz, 1995) a été conçu après établissement d'un semi-variogramme pour éviter les autocorrélations de position et les éventuelles périodes, l'effectif permettant d'estimer une moyenne spatiale non biaisée des teneurs en eau à 0.015 kg kg<sup>-1</sup> près.

Les points expérimentaux des deux courbes de retrait sont donnés dans la figure 3. Le modèle utilisé pour décrire la courbe de retrait de prisme est à deux droites, une droite de retrait structural à faible pente, puis une droite de retrait normal, de pente 1, selon l'équation :

$$v_p(t) = v_{wm}(t) + v_a + v_s$$

(1)

où  $v_p$  est le volume spécifique de prisme ( $m^3 Mg^{-1}$ ),  $v_s$  celui de solide,  $v_{wm}$  celui d'eau matricielle égale en valeur à  $W_m$ , teneur gravimétrique ( $kg kg^{-1}$ ), et  $v_a$  le volume spécifique d'air structural; le retrait résiduel n'a pas été atteint au champ. Le volume spécifique d'air pendant le retrait normal exprime l'importance des pores structuraux intra-prisme.

Le modèle utilisé pour décrire la courbe de retrait de couche correspond au retrait normal des prismes, en incluant les fissures inter-prisme dans la couche (Voltz et Cabidoche, 1995) : l'écart entre les deux courbes est le volume spécifique fissural. Ce modèle n'inclue pas a priori des mouvements équidimensionnels : il intègre un coefficient dimensionnel, rapport entre les composantes horizontale et verticale des mouvements de solide. L'équation de la courbe de retrait est :

$$v(t) = [v_{wm}(t) + v_a + v_s] * [(ke(t)/e_{AE} + 1 - k)^{-2}] \quad (2)$$

où  $k$  est le coefficient dimensionnel ( $m m^{-1}$ ),  $v$  est le volume apparent spécifique de sol ( $m^3 Mg^{-1}$ ),  $e(t)$  est l'épaisseur instantanée de la couche de sol (mm), et  $e_{AE}$  son épaisseur au point d'entrée d'air fissural, peu différente de l'épaisseur maximale. Le suivi de plusieurs séquences de dessiccations a montré la validité de ce modèle, et des mouvements verticaux légèrement supérieurs aux horizontaux ( $k=0.89 m m^{-1}$ ) (Cabidoche et Voltz, 1995).

### Utilisation de THERESA pour mesurer la teneur en eau matricielle et le volume fissural

Une fois connu le rapport entre les composantes verticale et horizontale des déformations, la mesure d'épaisseurs de couches par THERESA permet de calculer en continu (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1995) :

(i) le volume spécifique d'eau matricielle (fig.5), définie comme l'eau dont les gains ou pertes engendrent des mouvements, selon l'équation :

$$v_{wm}(t) = [[v_{wAE} + v_a + v_s] * [(ke(t)/e_{AE} + 1 - k)^{-2}] * [e(t)/e_{AE}]] - v_a - v_s \quad (3);$$

le système, autorisant un nombre élevé de capteurs, permet d'estimer la moyenne spatiale de cette teneur en eau, malgré sa forte variabilité spatiale (fig.1).

(ii) le volume des pores macrofissurés, et la largeur des fissures si l'on connaît leur maille.

### Courbes de retrait-gonflement de sol : disjonction fonctionnelle des pores structuraux intra-prismes et des pores matriciels

Dans des conditions où les macro-fissures ne contiennent pas d'eau, la différence entre les teneurs en eau calculées selon l'équation (3) et les teneurs en eau gravimétriques totales mesurées représente la teneur en eau structurale intra-prisme. Un Vertisol a été équipé d'un drainage par tuyaux interceptant les macro-fissures, et de piezomètres permettant de détecter des périodes d'absence d'écoulements fissuraux ou de nappe en réseau, et a fait l'objet d'un suivi des variations d'épaisseur par THERESA et de profils hydriques à la tarière (Ruy, 1997). Les courbes de retraits de couches ainsi obtenues (fig.5) ne sont pas bi-univoques : à n'importe quel moment d'un retrait normal, la porosité structurale intra-prisme peut se remplir d'eau, puis se vider par consommation racinaire, sans variation importante de la teneur en eau matricielle dans les horizons (B). Le remplissage et la vidange de la porosité structurale sont donc prioritaires et rapides par rapport aux gonflements et retraits, ce qui suppose une stabilité de forme et une interconnexion de ces pores.

### Disponibilité de l'eau structurale pour les plantes, indisponibilité de l'eau matricielle

Des mesures couplées, d'une part de consommation d'eau par la méthode de flux de sève, et de croissance de la canne à sucre (*Saccharum officinarum*), plante à flux conservatif, et d'autre part de déstockage matriciel et total du sol, ont été mises en oeuvre dans une parcelle de canne

en culture pluviale sur Vertisol (Ozier-Lafontaine et Cabidoche, 1995). Elles ont confirmé la consommation prioritaire de l'eau structurale par la plante, et ont permis de montrer que la plante entre rapidement en stress hydrique, affectant la croissance, dès lors qu'elle sollicite l'eau matricielle après l'épuisement de l'eau structurale. Par ailleurs, quel que soit le potentiel de la matrice argileuse, ce stress disparaît à la moindre pluie remplissant même partiellement la porosité structurale intra-prisme.

### **Un nouvel outil d'étude de la porosité structurale intra-prisme**

L'importance fonctionnelle de cette porosité structurale mérite que l'on approfondisse l'étude de sa géométrie, de sa genèse, et de sa stabilité qui définissent la réserve facilement utilisable des Vertisols. Une méthode de moulage de cette porosité a été mise au point (Cabidoche et Guillaume, 1998), qui permet d'obtenir directement une vision tridimensionnelle des pores et de leur connexion. La forme tubulaire, prédominante dans les horizons (B), se présente sous forme de tignasses interconnectées, dont les diamètres atteignent 10  $\mu\text{m}$ . Une étude fine de la pente de la droite de retrait normal montre qu'elle est significativement supérieure à 1, ce qui est compatible avec une déformation des tubes semblable à celle de la matrice encaissante. Sous cette hypothèse, l'évaluation de la teneur en eau matricielle par THERESA est meilleure (fig.4).

### **Pilotage de l'irrigation par THERESA**

L'irrigation est délicate à conduire dans les Vertisols : (i) les instruments classiques de pilotage par l'état de l'eau dans le sol sont inadaptés, (ii) les bilans hydriques sont entachés d'une incertitude qui peut aboutir à un apport excessif, conduisant immédiatement à une asphyxie racinaire ; ils requièrent une évaluation stricte des apports, et ne renseignent pas sur l'efficacité d'une dose apportée pour la recharge de la réserve du sol.

THERESA est donc proposé pour le pilotage de l'irrigation des sols argileux gonflants (fig.2). Le début de sollicitation de l'eau matricielle s'accompagne d'un début de stress hydrique : il est traduit par une diminution d'épaisseur que détectent les transducteurs, par le dégagement d'un seuil bas de déclenchement. Après l'irrigation, l'épaisseur augmente, le retour au seuil initial indique une dose correcte. Si l'on atteint le seuil supérieur d'alerte d'excès d'eau, la dose, trop importante, sera réduite au tour suivant. Après adaptation des doses, on obtient un régime où seul est consommé et rempli le compartiment de porosité structurale intra-prisme, les macrofissures restant légèrement ouvertes pour aérer le sol.

### **Conclusion**

L'approche du système de porosité des Vertisols en trois compartiments est justifiée par les fonctionnalités et les modes d'écoulement différents qui les caractérisent :

- la porosité macro-fissurale, souvent trop ouverte pour accueillir des racines, est le siège d'écoulements turbulents d'eau redistribuée par le ruissellement local sous averses de forte intensité ; une nappe en réseau apparaît, qui réhumecte préférentiellement les parois des fissures et provoque une forte variabilité spatiale structurée des teneurs en eau (fig.1) entre bords et centres des prismes (Jaillard et Cabidoche, 1984).
- la porosité structurale intra-prisme, tubulaire jusqu'à des diamètres fins dans les horizons (B), représente la réserve en eau disponible pour les plantes, remplie et consommée prioritairement, dans une relative indépendance du potentiel de la matrice argileuse. Dans la couche superficielle, constituée d'agrégats naturels ou issus le travail du sol, des transferts d'eau structurale vers la porosité matricielle sont possibles, un enracinement plus dense peuvent extraire simultanément l'eau structurale et l'eau matricielle. Quoi qu'il en soit, la part jouée par l'activité biologique et les risques de pétrissage sous travaux du sol excessifs

incitent à étudier l'effet des systèmes de culture et des modes d'usage du sol sur le devenir de la porosité structurale, qui conditionne la disponibilité de l'eau pour les plantes.

- la porosité matricielle, dont la perte ou le gain d'eau sont générateurs des mouvements du sol, présente une faible conductivité hydraulique. Cette eau est difficilement utilisable par les plantes, sauf aux potentiels élevés et si celles-ci sont pourvues d'un enracinement dense. La matrice est réhumectée par les écoulements fissuraux en bordure de prisme, par des transferts verticaux lents, et selon des modalités à préciser par de faibles échanges en provenance des pores structuraux.

La modélisation complète des transferts d'eau en humectation dans un tel Vertisol doit prendre en compte ces trois compartiments et leurs termes d'échange (Ruy, 1997) :

- la porosité structurale intra-prisme, domaine d'écoulement libre dans des réservoirs de macropores en cascade,
- la matrice argileuse, domaine Darcien à un instant donné, avec une discrétisation bidimensionnelle verticale déformée en conséquence pour l'instant suivant,
- les fissures, domaine d'écoulement instantané alimentant une nappe en réseau,
- deux termes sources alimentant la matrice : un terme de fuite depuis la porosité structurale, et la nappe fissurale alimentant la bordure du prisme.

### **Bibliographie :**

BERNDT R.D., COUGHLAN K.J., 1976.- The nature of changes in bulk density with water content in a cracking clay. *Australian Journal of Soil Research*, 15 (1), 27-37.

BRONSWIJK J.J.B., 1988.- Modelling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, 97, 199-212.

BRUAND A., PROST R., 1987.- Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach. *Journal of Soil Science*, 38, 461-472.

CABIDOUCHE Y.-M., GUILLAUME P., 1998. A casting method for the three dimensional analysis of the intra-prism structural pores in Vertisols. *European Journal of Soil Science*, 49, under press.

CABIDOUCHE Y.-M., NEY, B., 1987.- Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. II. Analyse expérimentale des états hydriques associés à deux états structuraux en Vertisol irrigué. *Agronomie*, 7 (4), 257-270.

CABIDOUCHE Y.-M., OZIER-LAFONTAINE H., 1995.- THERESA: I. Matric water content measurements through thickness variations in Vertisols. *Agricultural Water Management*, 28, 133-147.

CABIDOUCHE Y.-M., VOLTZ M., 1995.- Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: II. A field study on a Vertisol. *European Journal of Soil Science*, 46, 345-355.

HAINES W.B., 1923. The volume-changes associated with variations of water-content in soil. *Journal of Agricultural Science*, 13, 296-310.

JAILLARD B., CABIDOUCHE Y.-M., 1984.- Dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant. I. Dynamique hydrique. *Science du Sol*, 3, 239-251.

JARVIS N., 1994.- The MACRO model (version 3.1). Technical description and sample simulations. Reports and Dissertations No. 19, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

OZIER-LAFONTAINE H., CABIDOUCHE Y.-M., 1995.- THERESA: II. Thickness variations of Vertisols for indicating water status in soil and plants. *Agricultural Water Management*, 28, 149-161.

RITCHIE J.T., BURNETT E., 1971. Dryland evaporative flux in sub-humid climate. II. Plant influences. *Agronomy Journal*, 63, 56-61.

RUY S., 1997. Les trois voies simultanées de l'infiltration dans un Vertisol de Guadeloupe : Etude expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, France, 243 p.

VOLTZ M., CABIDOUCHE Y.-M., 1995.- Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: I. Theoretical analysis. *European Journal of Soil Science*, 46, 345-355.

Mots clés : Vertisol, retrait, fissures, structure, matrice argileuse, porosité, eau, irrigation

Key words : Vertisol, shrinkage, cracks, structure, clay matrix, porosity, water, irrigation

Figure 1 : vertisol as a non-uniform deformable medium during shrinkage ; a) saturation  
 b) crack air entry c) normal shrinkage. Average thickness:  $e(t)$ ; at the crack air entry:  $e_{AE}$

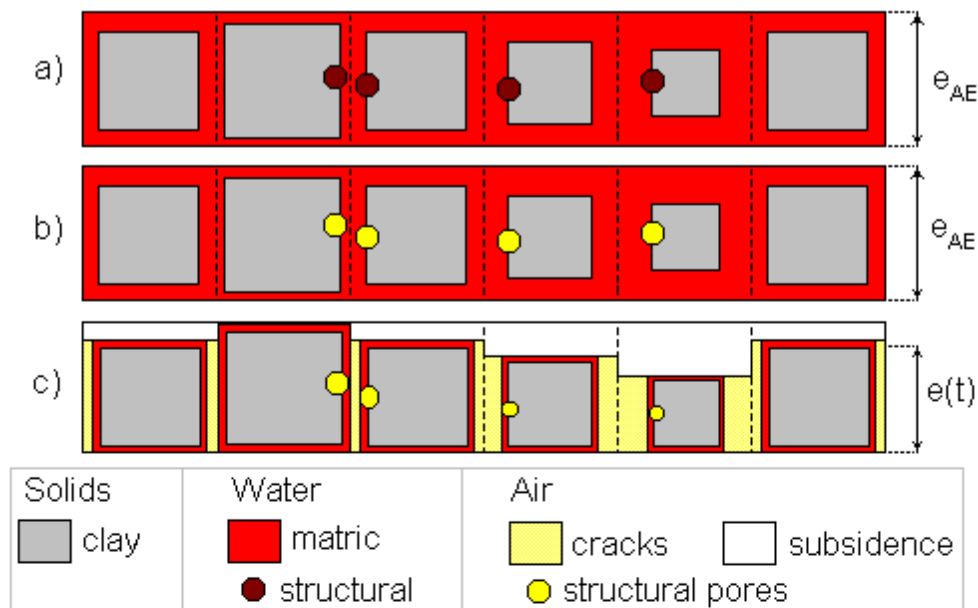


Figure 2 : the THERESA layer thickness transducer. 1, central PVC rod joined to the bottom of the layer by the aluminium thread 5. 2, PVC pipe joined to the top of the layer by the thread 4. 3, PVC pipe occupying the bore-hole free volume.

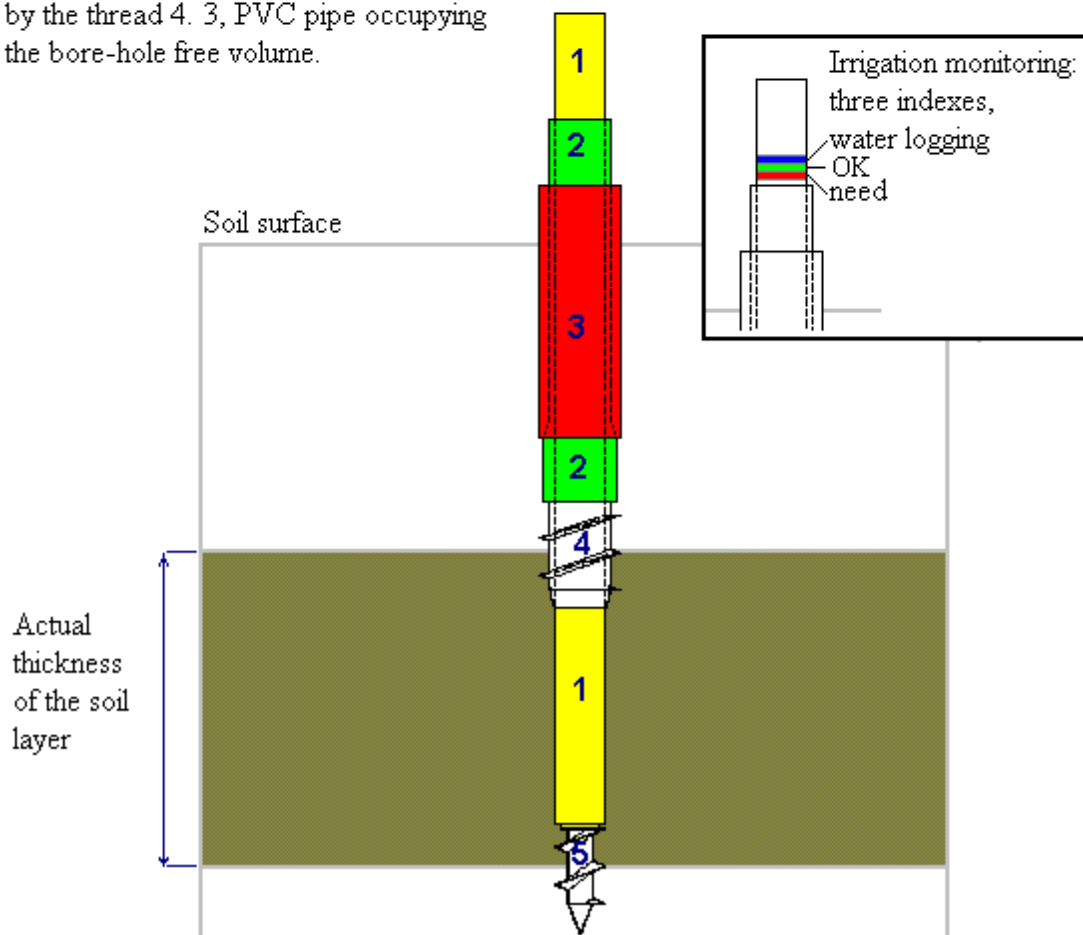


Figure 3 : Shrinkage curves, i.e. bulk specific volume  $n$  vs. specific volume of water  $n_w$  of a 40-80 cm vertisol layer including macro-cracks (calculated from thickness measurements) and of prism samples

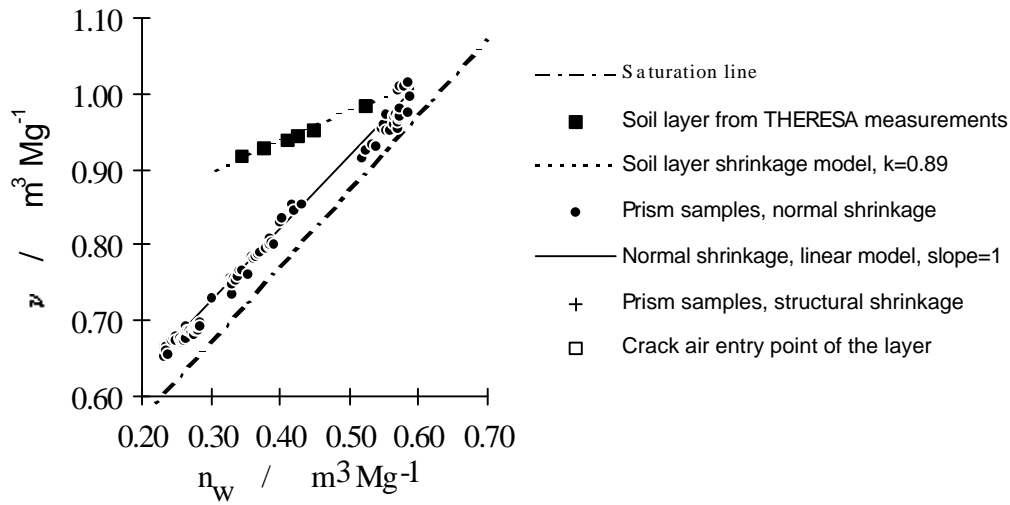


Figure 4 : comparison of measured matric water content  $W_m$ , and calculated  $W_c$  from THERESA layer thickness measurements

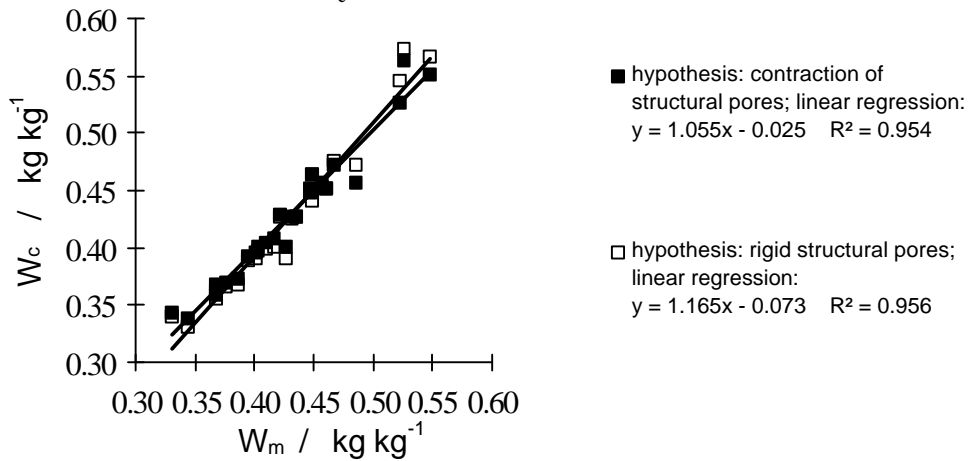


Figure 5 : Structural shrinkage phases superimposed to normal shrinkage in a 30-50 cm vertisol layer, including cracks

