

## CARACTERISATION ET MODELISATION DU GONFLEMENT ET DE L'ECOULEMENT D'UN VERTISOL NON SATURE

HAMMECKER Claude <sup>(1)</sup>, MAEGHT Jean-Luc <sup>(1)</sup>

et ANGULO-JARAMILLO Rafael <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> IRD.UR 67 Ariane, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

<sup>(2)</sup> LTHE, BP 53 38041 Grenoble Cedex 9, France

### RESUME

*Dans la vallée du fleuve Sénégal, région au fort potentiel agricole, la plupart des périmètres irrigués sont mis en place dans des cuvettes de décantation sur des vertisols. L'étude des transferts d'eau dans ces milieux est compliquée du fait de leurs propriétés de gonflement-retrait. Cet aspect a été étudié plus en détail au laboratoire sur un monolithe de sol non remanié de 60 cm de haut et 25 cm de diamètre, sur lequel on a pu quantifier les transferts hydriques et les variations de densité du sol en fonction de la teneur en eau le long du profil. Un modèle numérique rendant compte de ces processus a été testé lors d'une expérience d'imbibition et de séchage sur ce monolithe. A partir des paramètres hydrodynamiques et des courbes de retraits caractéristiques obtenus indépendamment, le modèle permet de décrire correctement le comportement du sol lors de cette expérimentation, permettant ainsi de pouvoir distinguer clairement l'infiltration s.s. du phénomène de gonflement.*

**Mots clés :** Monolithe de sol, vertisol, gonflement, retrait, hydrodynamique, modélisation.

### CHARACTERIZATION AND MODELLING OF SWELLING PROCESS AND UNSATURATED FLOW IN A VERTISOL

**Keywords:** soil monolith, vertisol, swelling, shrinkage, hydrodynamics, modelling

### 1. INTRODUCTION

Les développements récents de l'irrigation dans la vallée du fleuve Sénégal justifient une étude approfondie des processus de transferts d'eau et de solutés dans les sols de cette région dans la mesure où il existe des risques de dégradation par différents processus de salinisation. Cependant ces sols étant des vertisols développant des mécanismes de gonflement-retrait, il faut tenir compte de ces processus pour modéliser les transferts hydriques et ainsi prévoir les risques de dégradation. Les transferts hydriques en milieu gonflant sont généralement abordés soit à l'échelle macroscopique, basée sur l'équation de Darcy (GIRALDEZ et SPOSITO, 1978, 1983, 1985 ; KIM *et al.*, 1992) soit à l'échelle microscopique basée sur les équations de Navier-Stokes

(TULLER et OR, 2003). Pour appréhender ces mécanismes de manière précise nous avons travaillé sur un monolithe de sol non remanié sur lequel un maximum de paramètres ont été mesurés tout en conservant les contraintes mécaniques de terrain, à savoir la charge de la colonne de sol agissant sur le gonflement.

## 2. THEORIE

Dans les matériaux déformables les particules solides se déplacent les unes par rapport aux autres. Le mouvement de l'eau peut se décrire soit dans un système de coordonnées spatiales physiques (approche eulérienne), soit dans un système de coordonnées matérielles (approche Lagrangienne). La loi de Darcy, quant à elle, est définie pour décrire le transfert d'eau par rapport à la phase solide (SMILES, 1995). Considérant les relations décrivant d'une part la déformation du sol et d'autre part les transferts d'eau dans le sol, on peut formuler le problème en coordonnées, ou eulériennes, ou lagrangiennes. Dans la première approche on s'intéresse à des points fixes invariants dans le temps, alors que dans la seconde, on privilégie plutôt l'histoire subie par les particules individuelles. Ainsi dans la description lagrangienne on introduit des coordonnées matérielles  $m(z,t)$  définies par SMILES et ROSENTHAL (1968) comme :

$$\frac{dm}{dz} = \frac{1}{1+e} = \theta, \quad (1)$$

où  $e$  représente l'indice des vides. Ainsi l'écoulement monodimensionnel peut être décrit par l'équation de Richards modifiée (PHILIP, 1969) :

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial m} \left( K_m \frac{\partial \psi_w}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial m} \right) = \frac{\partial}{\partial m} \left( D_m \frac{\partial \vartheta}{\partial m} \right) \quad (2)$$

L'état hydrique décrit dans l'équation (2) étant exprimé en terme d'indice d'humidité  $\vartheta = \theta_w / \theta$ . Cependant la conductivité hydraulique et la diffusivité matérielles exprimées en coordonnées lagrangiennes peuvent toujours être reliées à leurs équivalentes eulériennes (GERARD-MARCHANT et al., 1997) :

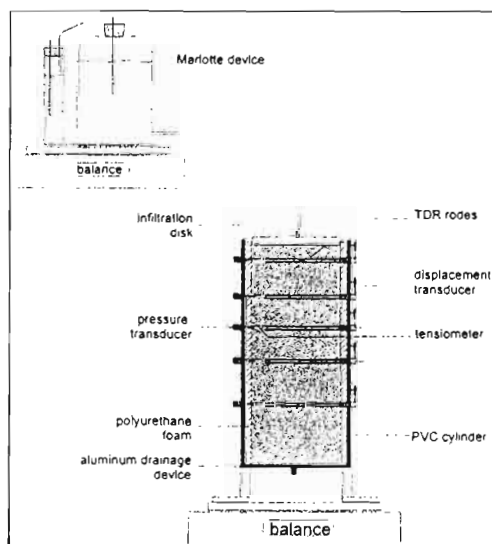
$$K_m(\vartheta) = \frac{K_{v,i}}{1+e} \quad (3a)$$

$$D_m(\vartheta) = \frac{1+e-\vartheta}{(1+e)^2} \frac{de}{d\vartheta} D_{v,i} \quad (3b)$$

L'équation (2) décrivant les transferts d'eau et les mouvements solides, peut être résolue grâce aux solutions analytiques ou résolutions numériques qui ont été développées par ailleurs pour les équations de diffusion et de transferts dans les milieux rigides.

### 3. MATERIEL ET METHODES.

L'étude a été réalisée sur un monolithe de sol non remanié, prélevé dans la vallée du fleuve Sénégal, dans la station agronomique de l'ISRA de Fanaye, où l'on pratique essentiellement la riziculture. Il s'agit d'un sol lourd et argileux (65% d'argiles) présentant une structure polyédrique et vertique ainsi que des faces de glissement et des fentes de retrait. Le monolithe a été prélevé par enfoncement vertical d'un tube de PVC de 23 cm de diamètre et 60 cm de haut. Pour l'expérimentation au laboratoire, le monolithe de sol a été placé dans un cylindre plus large rempli de mousse polyuréthane, qui vient appliquer un film de polyéthylène sur les parois du monolithe, de manière à éviter les écoulements latéraux et à permettre les mouvements de gonflement et retrait (**figure 1**). L'infiltration d'eau dans la colonne est réalisée grâce à un dispositif d'infiltromètre à disque permettant d'appliquer une légère dépression sur l'eau au contact du sol, par des vases de Mariotte, et de quantifier précisément les flux d'eau entrants. La tension matricielle et la teneur en eau sont mesurées le long de la colonne tous les 10 cm (de 5 jusqu'à 45 cm) à l'aide de tensiomètres et sondes TDR respectivement. Les sondes TDR (ESI PM-917, type Z) ont été calibrées spécialement pour ce type de sol argileux par rapport à la teneur en eau pondérale ( $\omega$ ) qui sera ensuite rapportée à des teneurs en eau volumiques ( $\theta$ ) en fonction des variations de densité apparente ( $\rho_d$ ).



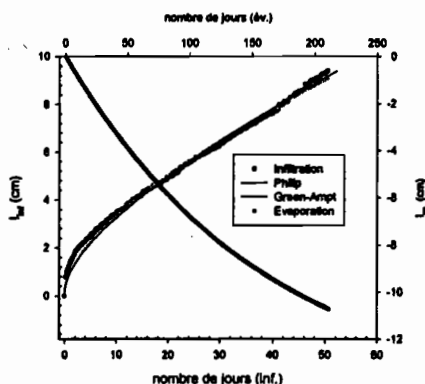
**Fig. 1 – Schéma du dispositif expérimental**  
*Experimental set-up*

Les phénomènes de gonflement et retrait ont été mesurés à l'aide de capteurs de déplacement électroniques (RDP Electronic Ltd, serie DCT) et les déplacements

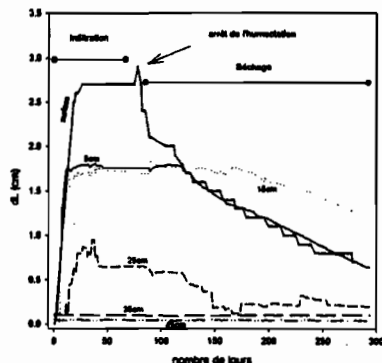
latéraux ont été mesurés manuellement au niveau de chaque sonde TDR. Après une phase d'infiltration en maintenant une tension nulle à la surface du sol, le monolithe a été soumis à un séchage modéré, à 25°C et une HR de 40 à 50%, par la surface supérieure du monolithe. Celui-ci étant placé sur une balance, le flux d'évaporation est donc déterminé en continu.

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

Le monolithe de sol a été soumis à un cycle d'infiltration depuis la surface supérieure, suivi d'un cycle de séchage. Dans les deux cas, les flux en surface ont été quantifiés ainsi que le mouvement du monolithe à différentes profondeurs (figures 2 et 3). L'infiltration a été réalisée avec précaution de manière à éviter les écoulements latéraux, ce qui est attesté par la courbe d'infiltration. Le flux de séchage quant à lui est modéré avec un maximum à 0.9mm/j afin d'empêcher la formation prématurée de fissures en surface. Lors de l'infiltration d'eau dans le monolithe la surface de celui-ci est montée de 2.7cm, mais lors du séchage, bien que la totalité de l'eau soit ressortie, le monolithe n'a pas retrouvé sa taille originelle car, comme le montre la figure 3, il ne s'est rétracté que de 2 cm. Par ailleurs, on remarque qu'au-delà de 25 cm de profondeur, les mécanismes de gonflement-retrait n'existent plus et que le sol se comporte apparemment comme un milieu rigide. Le suivi des capteurs de déplacement à chaque niveau du monolithe a permis de déterminer les variations locales de densité apparente ( $\rho_d$ ) et en combinaison avec les mesures de teneur en eau pondérales ( $\omega$ ), il a été possible de caractériser l'évolution de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de l'indice d'humidité ( $\theta$ ).



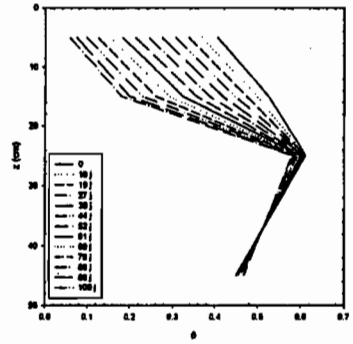
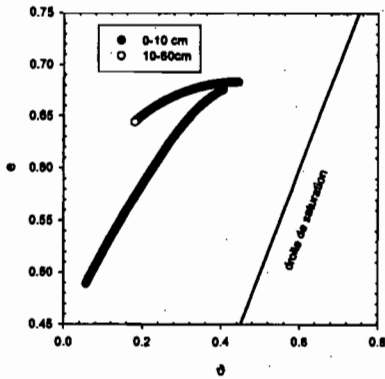
**Fig. 2 - Infiltration et évaporation**  
*Infiltration and evaporation*



**Fig. 3 - Déplacement vertical du monolithe - Vertical displacement of the soil monolith**

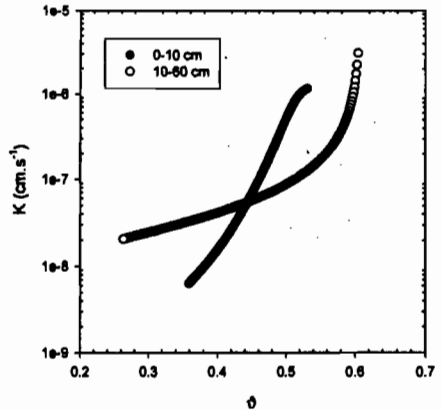
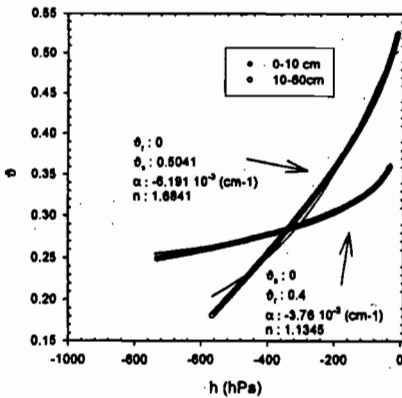
Deux niveaux caractéristiques ont été distingués : les dix premiers centimètres présentent des propriétés singulières par rapport au reste de la colonne (figure 4). Les paramètres hydrodynamiques caractéristiques de ces deux niveaux  $h(\theta)$  et  $K(\theta)$  ont ainsi pu être déterminés à partir de l'expérience de séchage (figures 6 et 7).

Les fonctionnelles de VAN GENUCHTEN (1980) ont été ajustées sur ces données afin de permettre de modéliser le processus. Les profils d'humidité au cours de la phase de séchage montrent que seuls les 25 premiers centimètres supérieurs sont affectés par la désaturation et qu'au-delà le sol reste pratiquement à saturation même après trois mois de séchage.



**Fig. 4 -** Indice des vides en fonction de l'indice d'humidité  
*Void ratio versus water volume ratio*

**Fig. 5 -** Profils d'humidité lors du séchage – *Humidity profiles during the drying stage*



**Fig. 6 -** Courbe de rétention  
*Retention curve*

**Fig. 7 -** Conductivité hydraulique  
*Hydraulic conductivity*

## 5. CONCLUSION

L'étude des transferts hydriques dans un sol gonflant a pu être réalisée au laboratoire grâce à un dispositif expérimental constitué d'un monolithe de sol non remanié de taille relativement importante (25 cm de diamètre et 60 cm de haut). Il a ainsi été possible de quantifier précisément les cinétiques de transfert tout en mesurant les propriétés de gonflement et retrait le long du profil de sol. Par ailleurs, de par la taille de l'échantillon, nous avons pu prendre en compte l'effet de la charge sur les processus de gonflement et ainsi noter qu'en dessous de 25 cm, le sol se comporte comme un milieu rigide. Ces expériences ont également permis de déterminer les paramètres de transferts non saturés ( $h(\vartheta)$  et  $K(\vartheta)$ ) pour chaque niveau dans le monolithe de sol, en vue de modéliser ces processus par ailleurs.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GERARD-MARCHANT, P., R. ANGULO-JARAMILLO, R. HAVERKAMP, M. VAUCLIN, P. GROENEVELT, ELRICK D.E., 1997 - Estimating the hydraulic conductivity of slowly permeable and swelling materials from single-ring experiments. *Water Resour. Res.*, 33 (6) : 1375-1382.
- GIRALDEZ J.V., SPOSITO G., 1978 - Moisture profiles during steady vertical flows in swelling soils. *Water Resour. Res.* 14:314-318.
- GIRALDEZ J.V., SPOSITO G., 1983 - A general soil volume change equation : II. Effect of load pressure *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:422-425
- GIRALDEZ J.V., SPOSITO G., 1985 - Infiltration in swelling soil. *Water Resour. Res.* 21:33-44.
- KIM D.J., DIELS J., FEYEN J., 1992 - Water movement associated overburden potential in a shrinking marine clay soil. *J. Hydrol* 133,179-200.
- PHILIP, J.R., 1969 - Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soil. *Water Resour. Res.*, 5 : 1070-1077.
- SMILES, D.E., 1995 - Liquid flow in swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:313-318.
- SMILES, D.E., ROSENTHAL M.J., 1968 - The movement of water in swelling material. *Aust. J. Soil Res.*, 6: 237-248.
- TULLER M. OR. D., 2003 - Hydraulic functions for swelling soils: pore scale considerations. *J. Hydrol.* 272:50-71

# MILIEUX POREUX ET TRANSFERTS HYDRIQUES

BULLETIN DU GROUPE FRANCOPHONE HUMIDIMETRIE  
ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX

NOVEMBRE 2002

