

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Écoulements dans les sols non saturés: essais et modélisation physique en centrifugeuse géotechnique

Flows in unsaturated soils: testing and physical modelling in geotechnical centrifuge

P.Crançon – Commissariat à l'Energie Atomique, Département Analyse et Surveillance de l'Environnement, Service Radioanalyse Chimie Environnement, BP12, F-91680 Bruyères-le-Châtel, France

L.Thorel & J.Garnier – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Reconnaissance et Mécanique des Sols. Section Mécanique des Sols et Centrifugeuse. Route de Bouaye, BP4129, F-44341 Bouguenais Cedex, France

**RESUME :** Dans les sols, la zone non saturée présente de forts gradients de teneur en eau; des suctions importantes peuvent s'y développer, affectant le comportement mécanique des sols et les interactions sol-structure. Des écoulements transitoires engendrent, localement, des augmentations de teneur en eau, voire de fortes accumulations d'eau qui peuvent influencer sur la sécurité des ouvrages (stabilité des pentes par exemple).

Cet article présente quelques études expérimentales d'essais en centrifugeuse concernant des écoulements dans des colonnes de sable saturé et non saturé. Des essais de drainage dans les sables fins initialement saturés sont également présentés. Les lois d'échelle identifiées expérimentalement sur la hauteur d'ascension capillaire, sur les caractéristiques de la courbe de rétention d'eau, sur la vitesse de Darcy et sur le temps de drainage sont en accord avec la théorie.

Cette étude montre la faisabilité de la modélisation physique des phénomènes capillaires (au sens large) dans les sables.

**ABSTRACT :** In soil unsaturated zone, strong gradients and high suctions occur that can affect the mechanical behaviour of soils, and soil-structure interactions. Transient flows create local soil moisture increase or strong accumulation of water that can affect civil engineering works (slopes stability, for instance).

This paper deals with experimental studies carried out on centrifuges and concerning flows in saturated and unsaturated sand columns. Drainage tests on initially saturated fine sands are also presented. Scale laws on capillary rise, water retention curve characteristics, Darcy fluid velocity and drainage time are experimentally determined and are found to be consistent with the theory. This study shows the suitability of capillary processes physical modelling into sandy soils.

## 1 INTRODUCTION

La zone non saturée du sol constitue l'interface mobile entre l'atmosphère et la surface libre de la nappe phréatique. Cette zone présente des profils verticaux de teneur en eau très hétérogènes, avec de forts gradients entre la surface du sol et la frange capillaire. Des suctions importantes peuvent s'y développer, affectant le comportement mécanique des sols (e.g. Fredlund & Rahardjo, 1993 ; Corté, 1989) et les interactions sol-structure (Bagge et al., 1987).

Pour appréhender ce type de problème par la modélisation physique sur modèles réduits centrifugés, des expérimentations préliminaires sont nécessaires afin de valider les règles de similitude qui permettront de relier le comportement du modèle réduit à celui du prototype.

## 2 ECOULEMENTS DANS LES SOLS

Des écoulements transitoires, causés par l'infiltration de l'eau de pluie engendrent, localement, des augmentations de teneurs en eau, voire de fortes accumulations d'eau qui peuvent influencer sur la sécurité des ouvrages (stabilité des pentes par exemple). Les écoulements sont généralement

régis par la loi de Darcy qui peut être élargie au cas multiphasique. Dans un sol saturé, elle s'écrit<sup>1</sup> :

$$n \underline{V}_T = - k_b [ \underline{\text{grad}} P + \rho n (g - \underline{\Gamma}) ] / \eta \quad (1)$$

Dans les sols non saturés, la formulation fait intervenir les perméabilités relatives des différentes phases en présence. La hauteur d'ascension capillaire est régie par la loi de Young-Laplace (ou de Jurin) :

$$h_c = 2 \cdot T_{swa} \cos \beta / (r g \Delta \rho) \quad (2)$$

Le profil vertical de teneur en eau dans un sol non saturé au dessus de la surface libre (Leong & Rahardjo, 1997) suit une évolution du type Van Genuchten :

$$\theta(z) = \theta_R + (\theta_S - \theta_R) \left[ 1 + (\alpha \cdot z)^n \right]^{-m} \quad (3)$$

Cette relation peut être inversée en :

$$z = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta(z) - \theta_R}{\theta_S - \theta_R} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Les différentes notations sont détaillées en fin d'article.

### 3 EFFETS DE LA MACROGRAVITE SUR LES ECOULEMENTS

#### 3.1 Similitudes classiques

Les relations de similitude permettent de relier les propriétés de deux points homologues, l'un appartenant au modèle réduit, l'autre au prototype. Un facteur d'échelle lié à une grandeur  $x^*$  se définit par le rapport de sa valeur dans le modèle réduit sur sa valeur dans le prototype ( $x^* = x^M/x^P$ ). Les facteurs d'échelle les plus utilisés lors d'essais en macrogravité (haut du Tableau 1) ont été établis au XIX<sup>ème</sup> siècle (Phillips, 1869).

#### 3.2 Similitudes sur les écoulements

En exploitant la relation (1), on peut ainsi établir les relations de similitude qui vont régir les écoulements dans les sols non saturés centrifugés et donc soumis à une macrogravité d'intensité  $N$ . On réécrit les équations en remplaçant «  $g$  » par «  $Ng$  ». En utilisant le même sol et les mêmes fluides dans le modèle réduit et dans le prototype, certaines grandeurs sont inchangées ( $n^* = k_h^* = 1$  ;  $\rho_{as}^* = \rho_{fl}^* = \eta^* = 1$ ), la pression fluide suit la même règle que la contrainte ( $P^* = 1$ ). Le facteur d'échelle sur la vitesse de Darcy de l'écoulement est  $V^* = N$ . Comme  $V^* = z^*/t^*$  est aussi vérifiée, sur un modèle réduit centrifugé, le facteur d'échelle sur le temps de l'écoulement s'écrit  $t^* = 1/N^2$ . On retrouve ainsi le facteur d'échelle déduit des équations de la diffusion.

En étudiant (2), on voit (Laut, 1975) que la hauteur d'ascension capillaire sera réduite d'un facteur  $1/N$ .

Les teneurs en eau volumiques sont adimensionnelles. En supposant que les paramètres d'ajustement de (3) ou (4) sont des paramètres intrinsèques au sol et donc non modifiés par l'application des lois de similitude, la courbe de rétention d'eau dans un sol non saturé sera modifiée en suivant le facteur d'échelle de la seule variable  $z$ . En macrogravité, la courbe de rétention devrait ainsi être « écrasée » selon  $z$  d'un facteur  $1/N$ .

#### 3.3 Modélisation expérimentale en centrifugeuse des écoulements en milieux poreux

La modélisation physique en centrifugeuse est devenue une activité de recherche significative dans les années 1970-1980. Les écoulements dans les sols ont été étudiés sur modèles réduits centrifugés dès cette époque, en mettant l'accent particulièrement sur les écoulements transitoires ou permanents dans la zone saturée des remblais en terre (Al-Hussaini et al., 1981, Cargill & Ko, 1983). Une présentation des relations de similitude des

Tableau 1 Facteurs d'échelle les plus courant

GRANDEUR	FACTEUR D'ECHELLE
Longueur, déplacement	$l^* = 1/N$
Masse volumique	$\rho^* = 1$
Forces de masse	$g^* = N$
Contrainte	$\sigma^* = 1$
Force	$F^* = 1/N^2$
Temps	$t^* = 1/N^2$
Vitesse (de Darcy)	$V^* = N$

écoulements d'eau en milieu saturé a récemment été publiée (Khalifa et al., 2000).

L'étude du transport de polluants en centrifugeuse s'est quant à elle considérablement développée dans les années 1980-1990. Les premières approches concernaient les produits miscibles à l'eau (Arulanandan et al., 1988), par exemple du chlorure de sodium (Culligan-Henley & Savvidou, 1995). Dans cette dernière référence sont exposés le formalisme des phénomènes de transports, ainsi que quelques résultats d'expérimentations en centrifugeuse. L'étude de l'écoulement de fluide non miscible est plus récente (Illangasekare & al, 1991), mettant en œuvre une approche tri-phasique en milieu poreux (e.g., Knight & Mitchell, 1996). D'autres communications ont été publiées lors du symposium NECER 2000 de La Baule (Garnier et al., 2000).

### 4 EXPERIMENTATIONS REALISEES

Les centrifugeuses géotechniques sont utilisées couramment pour l'étude d'interaction sol-structure (e.g ; Kimura et al., 1998). L'instrumentation aujourd'hui embarquée permet des mesures en vol qui doivent conduire à une meilleure connaissance des conditions de similitude et des caractéristiques des écoulements dans les milieux poreux centrifugés, en particulier en ce qui concerne les écoulements triphasiques. L'objectif des essais présentés dans le présent article est de procéder à une vérification expérimentale de la validité des lois d'échelle théoriques sur l'ascension capillaire et sur la vitesse d'écoulement de l'eau dans le milieu poreux.

Tableau 2. Caractéristiques des centrifugeuses

	CEA	LCPC
	Latecoère SILAT 265	Acutronic 680-2
Rayon [m]	10	5.5
Accélération max [G]	100	200
Vit. rotation max [tr/mm]	96	200
Vol. embarqué $L^*H$ [m <sup>3</sup> ]	1,3*0,8*0,4	1.4*1.15*1.5

Tableau 3 : Propriétés granulométriques des sables.

	Congleton	Fontainebleau	Landes
$d_{10}/d_{50}$ [mm]	0,1/0,15	0,15/0,2	0,2/0,3

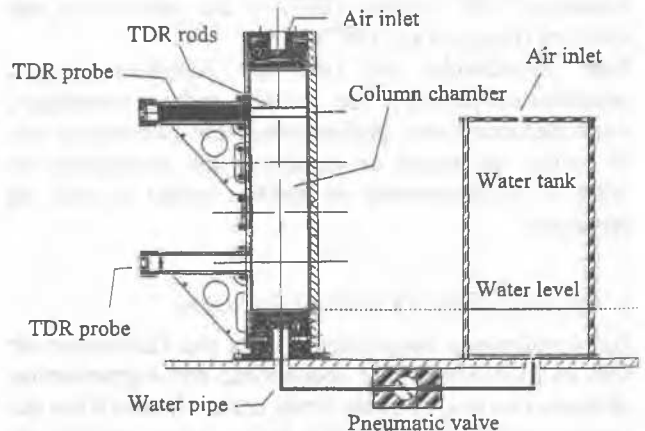


Figure 1 : Dispositif embarqué au CEA

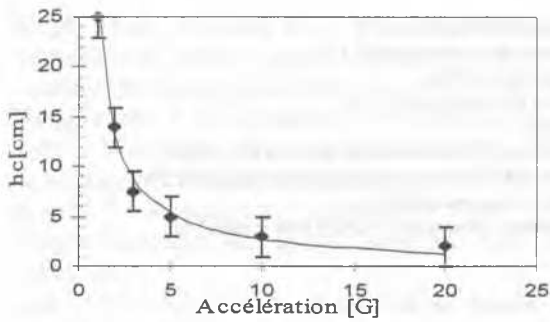


Figure 2 : Influence de la macrogravité sur la hauteur d'ascension capillaire dans le sable des Landes de Gascogne

#### 4.1 Centrifugeuses du CEA et du LCPC

Les essais ont été réalisés sur les centrifugeuses de grande dimension du CEA (Dutheil, 1998) et du LCPC (Corté & Garnier, 1986) dans une gamme d'accélération centrifuge variant de 2 à 40g (voir Tableau 2).

#### 4.2 Dispositif expérimental embarqué

Les écoulements étudiés en centrifugeuse ont été réalisés dans des colonnes de sable saturé et non saturé. Plusieurs sables ont été utilisés (sables de Fontainebleau, de Congleton et des Landes de Gascogne).

La mesure de la teneur en eau à 1g et en vol est réalisée à l'aide de sondes dont le principe est basé sur les variations des propriétés diélectriques du sol lors d'un écoulement : oscillateur capacitif au LCPC (Dupas et al., 2000) et sondes à Reflectométrie dans le Domaine Temporel (TDR) au CEA (Crançon et al., 2000). Des mesures pondérales classiques sont également réalisées à 1g, après arrêt de la centrifugeuse.

Le dispositif utilisé au LCPC est semblable à celui du CEA (Figure 1). Une différence majeure réside en l'utilisation d'un vase de Mariotte pour appliquer le niveau de nappe requis (Thorel et al., 2000). Ce procédé évite d'utiliser un trop-plein et a montré son efficacité dans les expérimentations d'ascension capillaire.

#### 4.3 Ascension capillaire

Comme indiqué par la relation (2) la hauteur d'ascension capillaire varie selon la relation  $h_c(Ng) = h_c(1g)/N$  (Figure 2). On retrouve le résultat déjà obtenu sur d'autres sables (Burkhart et al., 1998), pour lesquels seule la hauteur

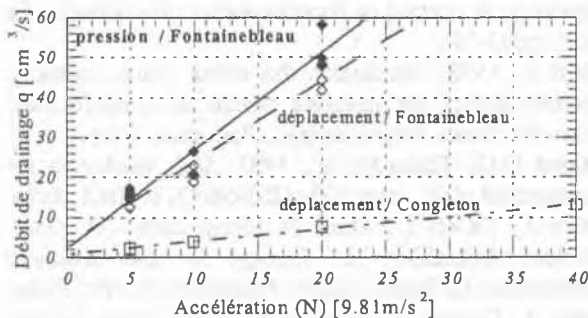


Figure 3 : Influence de l'accélération centrifuge sur les débits de drainage calculés à partir du déplacement d'un flotteur ou d'un capteur de pression.

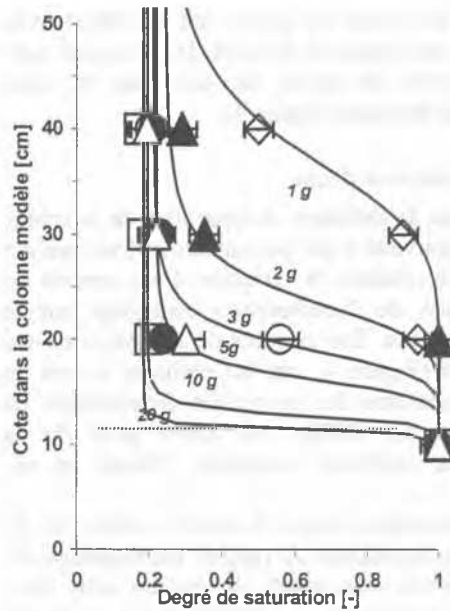


Figure 4 : Profils de saturation en eau du milieu poreux (Sables des Landes) dans la colonne en fin de drainage. Les données sont ajustées par le modèle de Van Genuchten.

d'ascension capillaire à 1g est différente. Ces résultats peuvent néanmoins être légèrement différents selon la définition prise pour la hauteur d'ascension capillaire : front visible entre le sable humide et le sable sec, ou point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau (cas retenu dans la présente étude).

#### 4.4 Essais de drainage

Les essais de drainage réalisés dans les sables initialement saturés permettent d'une part de vérifier la

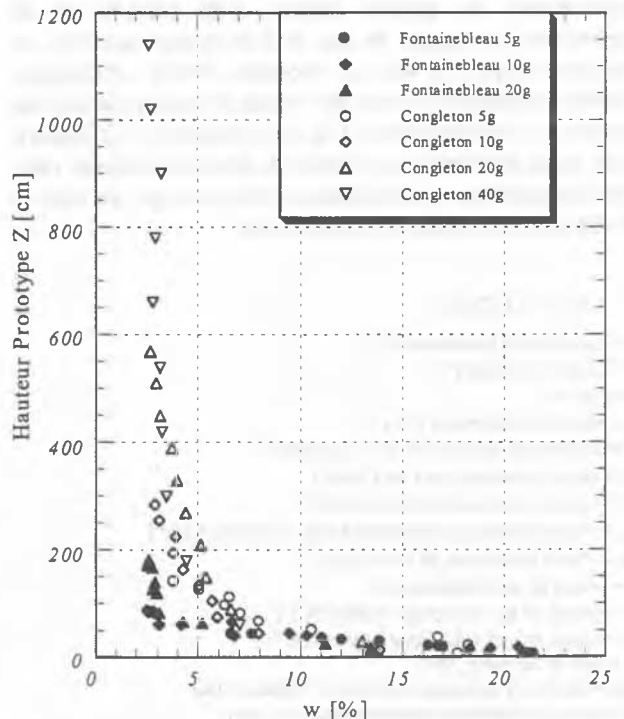


Figure 5 : Répartition des teneurs en eau dans le prototype

dépendance de la vitesse de Darcy (ou du débit) avec l'intensité de la macrogravité (Figure 3), et d'autre part d'accéder au profil de teneur en eau dans la zone désaturée après le drainage (Figure 4).

#### 4.5 Courbes de rétention d'eau

A la fin d'un essai de drainage, la répartition de la teneur en eau dans l'éprouvette n'est pas uniforme. Une analyse par ajustement de courbes de rétention d'eau permet de déduire l'influence de l'accélération centrifuge sur le profil de teneur en eau. Les mesures de saturation en eau du milieu poreux (Figure 4) ont été réalisées en vol en exploitant les variations des propriétés diélectriques du sol (Crançon et al., 2000), ou après arrêt de la centrifugeuse par méthode pondérale (Thorel et al., 2000).

Rapportées au prototype depuis le modèle réduit (de 30 cm de haut), et en appliquant un rapport homothétique de 1/N sur les hauteurs, les points de mesure sont alors regroupés dans un faisceau qui représente le profil de distribution de la teneur en eau sur une épaisseur totale de 12 m de sol (Figure 5).

## 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les lois d'échelle identifiées expérimentalement sur la hauteur d'ascension capillaire, sur les caractéristiques de la courbe de rétention d'eau, sur la vitesse de Darcy et sur le temps de drainage sont en accord avec la théorie. La stabilisation des profils de teneur en eau semble aussi dépendante des conditions initiales de pression appliquée à la base de la colonne.

Cette étude montre la faisabilité de la modélisation physique des phénomènes capillaires (au sens large) dans les sables, et leur extension potentielle à l'étude de phénomènes de grande échelle. Une maîtrise de la répartition des teneurs en eau dans la frange capillaire de différents types de sol, sur modèles réduits centrifugés, devrait permettre d'ouvrir des voies de recherche sur des matériaux intermédiaires (à la fois cohérents et frottants), mais aussi de prendre en compte la zone non-saturée dans certains problèmes de mécanique des ouvrages en terre et du transfert de polluants dans les sols.

## 6 NOTATIONS

$\alpha$  = paramètre d'ajustement [ $m^{-1}$ ]  
 $\beta$  = angle de contact [ $^\circ$ ]  
 $\Delta\rho = \rho_{fl} - \rho_a$   
 $\eta$  = viscosité dynamique [Pa.s]  
 $\Gamma$  = accélération particulière du fluide [ $m/s^2$ ]  
 $\rho_a$  = masse volumique de l'air [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_{fl}$  = masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_{as}$  = masse volumique apparente sèche du solide [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_w$  = masse volumique de l'eau [ $kg/m^3$ ]  
 $\theta$  = teneur en eau volumique [-]  
 $\theta_r$  = teneur en eau volumique résiduelle [-]  
 $\theta_s$  = teneur en eau volumique à saturation [-]  
 $G$  = gravité terrestre [ $m/s^2$ ]  
 $h(t)$  = hauteur d'ascension capillaire à l'instant  $t$  [m]  
 $h_c$  = hauteur d'ascension capillaire pour  $N=1$  [m]  
 $k_a$  = perméabilité intrinsèque du sol [ $m^2$ ]  
 $n$  = porosité du sol [-]  
 $n$  = paramètre d'ajustement [-]

$m$  = paramètre d'ajustement [-]  
 $N$  = intensité de la macrogravité [-]  
 $P$  = pression fluide [Pa]  
 $r$  = rayon d'un tube capillaire [m]  
 $t$  = temps [s]  
 $T_{swa}$  = Tension de surface eau-air-grain [0.072 N/m]  
 $V_r$  = vitesse du fluide par rapport au squelette solide [m/s]  
 $w$  = teneur en eau pondérale [-]  
 $z$  = coordonnée cartésienne orientée vers le haut [m]

## 7 REFERENCES

- Al-Hussaini M.M., Goodings D.J., Schofield A.N., et al. 1981. Centrifugal Modeling of Coal Waste Embankments *J. Geotech. Engng. Div.*, vol.107, GT4 pp481-499.
- Arulanandan, K., Thompson, P.Y., Kutter, B.L., et al. (1988). Centrifuge modelling of transport processes for pollutants in soils. *ASCE Journ. Of Geotech. Engng.*, 114(2), pp. 185-205
- Bagge G., Fulglsang L., James R.G. et al., 1987. Surface footings on a sand with a capillary zone. *XIIIth ICSMFE, Rio*, vol.2, pp887-890.
- Bennett R., 1999. Unsaturated soils come home. *Ground Engng*, may, pp26-28.
- Burkhart S., Thorel L., Rezzoug A., et al., 1998. Ecoulements en milieux poreux centrifuges : relations de similitude lors de la capillarité et de la lixiviation. *GFHN 98, LCPC Nantes, « Déchets et milieux poreux »*.
- Cargill K.W., Ko H.Y., 1983. Centrifugal Modeling of Transient Water Flow. *J. Geotech. Engng.*, vol.109, n°4 pp536-555.
- Corté J.F., Garnier J. 1986. Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique. *Bull. liaison laboratoires des Ponts et Chaussées*, 146, pp. 5-28, LCPC, nov-déc.
- Corté J.F., 1989. Model testing-Geotechnical model tests, XII ICSMFE Rio, 2553-2571.
- Crançon P., Guy C., Pili E., et al., 2000. Modeling of capillary rise and water retention in centrifuge tests using time domain reflectometry. *Proc. Int. Symp. Physical Modelling & Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule. pp199-206.
- Culligan-Hensley P.J., Savvidou C., 1995. Environmental geomechanics and transport processes. Chap.8 in *Geotechnical Centrifuge Technology*, R.N. Taylor (ed.), pp 196-263.
- Dupas A., Cottineau L.M., Thorel L., et al., 2000. Capacitive sensor for water content measurements in centrifuged porous media. *Proc. Int. Symp. Physical Modelling & Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule. pp11-18.
- Dutheil S., 1998. Simulation des effets d'une explosion enterrée. Essais sur modèles réduits en centrifugeuse. *Thèse de l'Ecole Polytechnique, Palaiseau*. 155p.
- Fredlund D.G., Rahardjo H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated soils*. John Wiley ISBN047185008X, 517p.
- Garnier J., Thorel L., Haza E. (Eds), 2000 *Int. Symp. Physical Modelling & Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule. ISBN2720860506, LCPC, 392p.
- Khalifa A. Garnier J., Thomas P., et al., 2000. Scaling laws of water flow in centrifuge models. *Proc. Int. Symp. Physical Modelling & Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule. pp207-216.

- Knight M.A., Mitchell R.J. 1996. Modelling of light nonaqueous phase liquid (LNAPL) releases into unsaturated sand, *Can. Geotech. J.*, vol.33, pp.913-925.
- Illangasekare T.H., Znidarcic, Al-Sheridda M., et al., 1991. Multiphase Flow In Porous Media. *Int. Conf. Centrifuge 91* Boulder / Colorado, pp.517-523.
- Kimura T., Kusakabe O, Takemura J. (eds), 1998. *Int. Conf. Centrifuge 98*. Tokyo, Balkema. 919p. ISBN90 5410 986 6.
- Laut, 1975. Application of centrifugal model tests in connexion with studies of flow patterns of contaminated water in soil structures. *Géotechnique*, vol. XXV, n°2, pp401-406.
- Leong E.C., Rahardjo H., 1997. Review of Soil-Water Characteristic curve equations. *J Geotech & Environ. Engng*, vol.123, n°12 pp 1106-1117.
- Phillips E., 1869. De L'équilibre des solides élastiques semblables, *Comptes Rendus hebdomadaires des Scéances de L'Académie des Sciences*, vol.68, serie 2, pp.75-79.
- Thorel L., Noblet S., Garnier J., et al., 2000 : Capillary rise and drainage flow through a centrifuged porous medium. *Proc. Int. Symp. Physical Modelling & Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule. pp.251-258.