

# 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.*

# Validation d'un modèle d'extraction d'eau par des racines d'arbre implanté dans $\theta$ -stock

## Validation of a tree roots water uptake model implemented in $\theta$ -stock

S. Hemmati

*Université Paris-Est, UR Navier, CERMES, Ecole des Ponts, Champs sur Marne, France*

B. Gatmiri

*Université de Téhéran, Département de génie civil*

*Université Paris-Est, UR Navier, CERMES, Ecole des Ponts, Champs sur Marne, France*

Y.-J. Cui

*Université Paris-Est, UR Navier, CERMES, Ecole des Ponts, Champs sur Marne, France*

M. Vincent

*BRGM, France*

### RÉSUMÉ

Un modèle 2D d'extraction d'eau par des racines d'arbre a été développé (Hemmati et Gatmiri 2008) et implanté dans  $\theta$ -stock (Gatmiri-CERMES 1997) qui est un code aux éléments finis Thermo-Hydro-Mécanique couplé pour l'analyse des milieux poreux multiphasiques. Le puisement d'eau par des racines est considéré comme un terme d'extraction dans la zone racinaire. Ce terme est fonction de la distribution spatiale de la densité de longueur des racines, de la transpiration potentielle et de la succion du sol. Dans cette étude, afin de valider le modèle implanté, certaines études de cas, présentées par Biddle (1998) sont modélisées. Un bon accord est obtenu entre les variations de la teneur en eau mesurée in-situ et les valeurs calculées. Les tassements correspondants à la variation de teneur en eau sont également calculés.

### ABSTRACT

A two dimensional model of roots water uptake has been developed (Hemmati and Gatmiri, 2008) and implemented in the  $\theta$ -stock (Gatmiri-CERMES 1997) which is a fully coupled Thermo-Hydro-Mechanical finite element program for analysis of multiphase porous media. The root water uptake is considered as a sink term distributed in the roots zone. This sink term is a spatial distribution function of roots density, potential transpiration and soil suction. In this study, in order to validate the implemented model, some case studies, presented by Biddle (1998) are modelled. Good agreement is obtained between the variations of water content measured in-situ and the calculated one. Soil settlements corresponding to water content variation are also calculated.

Keywords : roots water uptake, numerical modelling, soil-atmosphere-vegetation interaction, shrinkage-swelling, clay

## 1 INTRODUCTION

L'extraction d'eau par les racines des arbres se traduit par des changements de teneur en eau du sol, ce qui provoque le retrait et des tassements de ce dernier. En conséquence, des dégâts importants peuvent se produire, en particulier dans le cas de bâtiments légers avec des fondations superficielles. Ce phénomène est plus important dans les périodes de sécheresse de longue durée qui impliquent des variations de teneur en eau plus importantes.

Les études de l'extraction d'eau par les racines peuvent être classées en trois catégories. La première concerne l'approche microscopique qui s'intéresse aux flux d'humidité radiaux vers une seule racine. La deuxième catégorie est basée sur la considération du phénomène au niveau macroscopique. Le puisement de l'eau est traité comme un terme d'extraction dans les équations de bilan de masse d'eau, dans la zone racinaire. La troisième catégorie est une approche hybride qui est similaire à l'approche macroscopique, mais prend en compte également dans les équations décrivant l'écoulement d'eau les paramètres des racines et du sol qui dépendent du temps, tels que la distribution de densité de longueur des racines, le potentiel hydrique des racines et la succion du sol.

Un modèle 2D de l'extraction d'eau par les racines (Hemmati et Gatmiri 2008) a été développé et implanté dans le code de calcul aux éléments finis  $\theta$ -stock (Gatmiri 1997b). Il s'agit d'un code de calcul Thermo-Hydro-Mécanique couplé pour l'analyse du comportement des milieux poreux

multiphasiques. Le puisement d'eau par les racines est considéré comme un terme d'extraction dans la zone racinaire. Ce terme est fonction de la distribution spatiale de la densité de longueur des racines, de la transpiration potentielle et de la succion du sol. On présente ici quelques résultats de validation du modèle implanté en utilisant des données présentées par Biddle (1998). Ceci concerne aussi bien les variations de la teneur en eau que les tassements correspondants du sol.

## 2 MODELE D'EXTRACTION D'EAU PAR DES RACINES

Les modèles d'extraction d'eau par des racines existant dans la littérature sont assez semblables et leur principale différence réside dans l'utilisation des fonctions d'extraction ou des termes d'extraction. Ces modèles sont généralement basés sur l'équation de Richard avec un terme d'extraction  $S$  qui décrit le puisement d'eau par les racines d'arbres. Selon le modèle macroscopique de Feddes et al. (1978),  $S$  est exprimé comme :

$$S = \alpha S_{\max} \quad (1)$$

où  $S_{\max}$  est le taux maximal possible d'extraction considéré uniforme dans la profondeur. Dans les études plus récentes (Prasad 1988, Hayhoe et DeJong 1988, Li et al. 2001, Vrugt et al. 2001, Indraratna et al. 2006),  $S_{\max}$  est supposé d'être fonction de la densité de longueur des racines et de la transpiration potentielle:

$$S_{\max} = G(\beta) F(T_p) \quad (2)$$

où  $\alpha$  est un coefficient réducteur fonction de la succion du sol  $\psi$ , qui peut être exprimé en fonction de la teneur en eau  $\theta$  ou de la charge hydraulique  $h$ ;  $\beta$  est la distribution de la densité de longueur des racines;  $T_p$  est la transpiration potentielle;  $S_{max}$  est le taux maximal possible de l'extraction d'eau par des racines.

Dans cette étude, le modèle 2D de l'extraction proposé par Indraranta et al. (2006) est utilisé. L'extraction d'eau par des racines est considérée être fonction de la succion du sol, de la distribution de densité de longueur des racines et de la transpiration potentielle.

Les expressions pour les paramètres évoqués précédemment sont définies en considérant une relation non-linéaire entre la densité de longueur des racines et l'extraction d'eau relative selon Landsberg (1999) et une distribution linéaire de transpiration potentielle proposée par Nimah et Hanks (1973) :

$$S_{max}(r, z, t) = G(\beta) F(T_p)$$

$$G(\beta) = \frac{\tanh(k_3\beta)}{\int_{V(t)} \tanh(k_3\beta)}$$

avec  $\int_{V(t)} G(\beta) dV = 1$

$$\beta(r, z, t) = \beta_{max}(t) \exp(-k_1|z - z^*(t)| - k_2|r - r^*(t)|) \quad (3)$$

$$F(T_p) = \frac{T_p(1 + k_4(z_r - z))}{\int_{V(t)} G(\beta)(1 + k_4(z_r - z)) dV}$$

$k_3, k_4$ : coefficients expérimentaux  
 $k_1, k_2$ : coefficients empiriques  
 $T_r(t) = \int_V S(\psi, r, z, t) dV$

où  $T_r$  est la transpiration réelle d'arbre.

En ce qui concerne le coefficient réducteur  $\alpha$ , les expressions existant dans la littérature sont similaires et elles peuvent être représentées par la Figure 1. Leur principale différence réside dans l'utilisation de variables de pilotage : Feddes et al. (1978) utilisaient la succion tandis que Prasad (1988) utilisait la charge hydraulique.

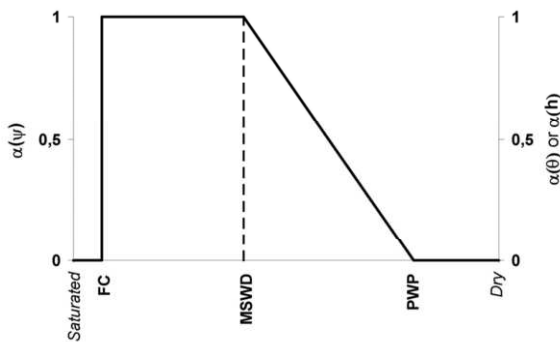


Figure 1. Coefficient réducteur,  $\alpha(\psi)$  ou  $\alpha(\theta)$  ou  $\alpha(h)$

Dans cette étude l'expression de Feddes *et al.* (1976), en fonction de la succion,  $\alpha(\psi)$  est adoptée. Le point FC est la capacité de champs, PWP est le point de flétrissement. MSWD correspond à une succion au-delà de laquelle l'extraction par des racines diminue.

### 3 PRÉSENTATION DE $\theta$ -STOCK

Les déformations du sol dues aux changements de teneur en eau sont significatives dans le cas des sols argileux sensibles au retrait-gonflement. Pour une description globale, la déformation, le transfert de l'humidité et le transfert de la

chaleur doivent être considérés de façon couplée. Pour des milieux poreux non déformables, il est bien admis que la théorie de Philip et de Vries (1957) constitue le cadre fondamental pour décrire les transferts de l'humidité et de la chaleur. Dans cette théorie, les équations du transfert d'humidité et de chaleur sont formulées en termes de température (T) et de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ). Quand il n'y a pas continuité de l'eau liquide, tous les transferts se font en phase vapeur, et en revanche, avec l'augmentation de la teneur en eau, l'eau liquide devient continue et les transferts se font de plus en plus en phase liquide. Une loi de comportement thermo-poro-mécanique des milieux non saturés est présentée par Gatmiri (1997a,b), Gatmiri *et al.* (1997a, b, 1999 et 2002), Gatmiri et Hoor (2007) et Gatmiri et Arson (2008). Dans cette loi, les équations du transfert d'humidité et de chaleur sont définies en fonction des pressions de l'eau et de l'air. Les formulations de la surface d'état en fonction de la température sont effectuées pour les variations de l'indice des vides et du degré de saturation. Les effets couplés entre la température, la teneur eau et la déformation du squelette sont considérés dans ce modèle à travers le concept de la surface d'état thermique. Différentes lois de comportement thermo-hydro-mécanique sont considérées : élastique linéaire, élastique non linéaire, élasto-plastique.

### 4 ETUDES DE CAS

Afin de valider le modèle implanté dans  $\theta$ -stock quelques études de cas présentées par Biddle (1998) ont été modélisées. On présente ici une étude de cas concernant une rangée de tilleuls de 17 m de hauteur. Les arbres sont à « Woodside Park » enracinés dans l'argile de Londres. Les mesures de teneur en eau ont été réalisées à 3,4m, 6,8m, 13,6m de la rangée des arbres à différentes profondeurs. Une mesure a été réalisée à une distance de deux fois la hauteur des arbres (34 m), qui est supposée de ne pas être affectée par les racines des arbres.

Une modélisation en déformation plane, avec des éléments quadrilatères a été réalisée. Le maillage global se compose de 943 noeuds et 880 éléments. Le duré climatologique considérée est de 6 mois. Le Tableau 1 montre les paramètres utilisés dans le modèle, qui sont basés sur les données disponibles dans la littérature. Les surfaces d'état en degré de saturation et en indice des vides utilisées sont présentées sur la Figure 2. Ces surfaces ont été étalonnées en se basant sur les courbes de retrait et de rétention d'eau de l'argile de Londres. L'indice des vides initial du sol est estimé en considérant la teneur en eau maximale du sol présentée par Biddle (1998).

#### 4.1 Terme d'extraction

Le modèle 2D présenté par Indraratna *et al.* (2006) a été implanté dans le code  $\theta$ -stock. En déterminant la distribution du taux de l'extraction d'eau par les racines d'arbre dans la zone racinaire à chaque incrément de temps, l'extraction est imposée proportionnellement sur les éléments de cette zone. Dans cette étude, il est supposé que l'arbre est bien développé et que les dimensions de la zone racinaire n'évoluent pas au cours du temps, conformément à l'état de l'arbre dans la période de l'étude par Biddle (1998).

#### 4.2 Conditions aux limites

En raison de la symétrie, un flux nul est imposé le long de la frontière gauche du maillage. Le modèle de l'interaction sol-atmosphère (Hemmati *et al.* 2008) a été utilisé pour calculer et imposer le flux de l'humidité et de la chaleur le long de la face supérieure des éléments. Les données météorologiques de la station de Londres sont utilisées dans ce calcul.

5 RESULTATS

Les diminutions de la teneur en eau volumique mesurées dans la période du printemps (début de la transpiration) au 27 septembre 1984 (6 mois) sont comparées avec les résultats de la simulation sur la Figure 3. Une bonne concordance est observée. Les diminutions de teneur en eau après 3 mois et après 6 mois sont présentées sur la Figure 4. On peut observer le changement de situation au niveau de l'extraction maximale

avec le temps. Il faut noter que dans cet exemple, la distribution de la densité de longueur des racines n'évolue pas au cours du temps et le changement de l'extraction maximale est dû au changement du degré de saturation du sol. Les tassements du sol après 3 mois et après 6 mois sont présentés sur la Figure 5. Une augmentation du tassement du sol et une propagation de la zone influencée par l'extraction des racines avec le temps sont observées.

Paramètre	Valeur	Ref.
$\psi_{FC}$	4,9 kPa (sols argileux)	Feddes <i>et al.</i> (1976)
$\psi_{MSWD}$	40 kPa	Feddes <i>et al.</i> (1978)
$\psi_{PWP}$	1500 kPa (point de flétrissement; $1,5MPa \leq \psi \leq 2MPa$ )	Feddes <i>et al.</i> (1978)
$r_0, z_0$	7m, 0,5m (estimé en se basant sur les mesures du site)	
$r_{max}, z_{max}$	14m, 1,2m (estimé en se basant sur les mesures du site)	
$T_p$	76 litres jour <sup>-1</sup>	
$k_1, k_2$	10 et 0,05 (coefficients de distribution de la densité de longueur des racines verticale et horizontale)	
$\beta_{max}$	25 m <sup>-2</sup>	Landsberg (1999)
$k_3$	0,0874 m <sup>-1</sup>	Landsberg (1999)
$k_4$	0 (la saturation potentielle est distribuée uniformément dans la profondeur)	

Tableau 1: Paramètres du modèle

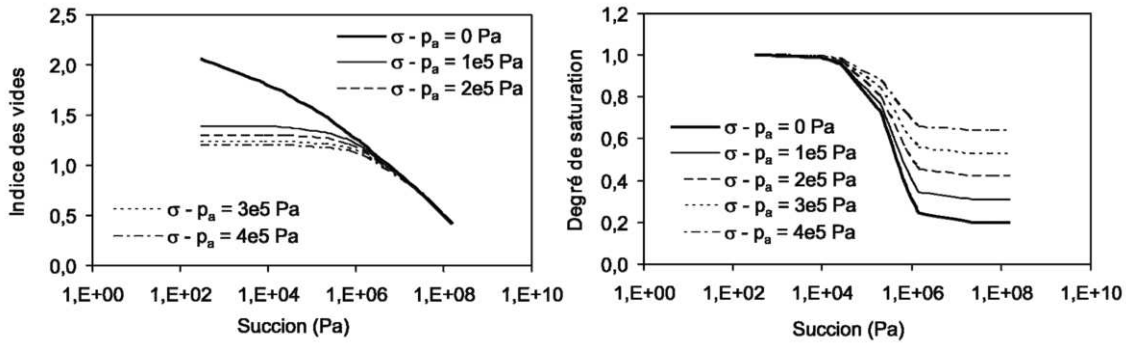


Figure 2 : Surfaces d'états en indice des vides et en degré de saturation

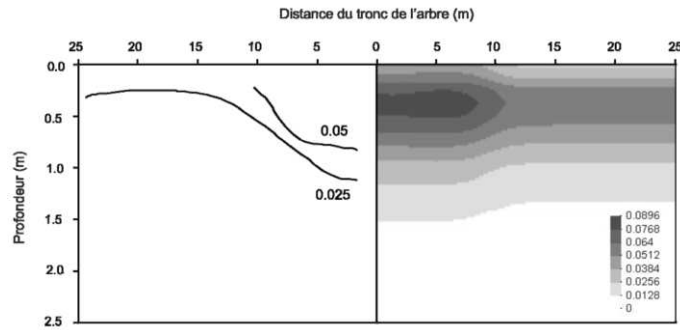


Figure 3 : Comparaison des diminutions de la teneur en eau volumique entre les mesures (gauche) et les calculs (droite) après 6 mois de transpiration

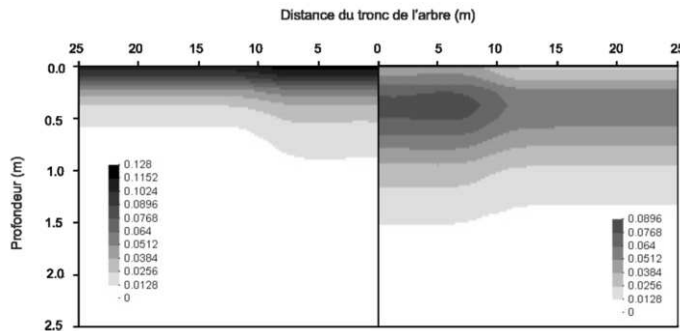


Figure 4 : Diminutions de la teneur en eau après 3 mois (gauche) et après 6 mois (droite) de transpiration

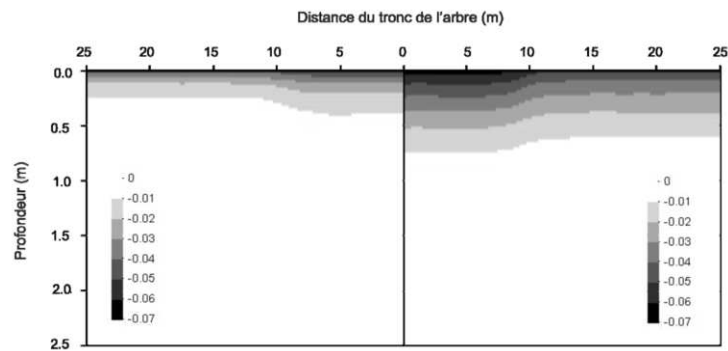


Figure 5 : Tassement du sol calculé après 3 mois (gauche) et après 6 mois (droite) de transpiration

## 6 CONCLUSIONS

Dans cette étude, une analyse d'extraction d'eau par des racines est présentée en termes de variations de teneur en eau et de tassements. L'extraction d'eau par des racines est principalement fonction de la densité de longueur des racines, de la transpiration potentielle et de la succion du sol. Les variations de teneur en eau volumique le long d'une rangée de tilleuls mesurées par Biddle (1998) ont été considérées pour valider le modèle adopté. Pour ce faire, les données météorologiques de la station de Londres sont utilisées pour déterminer les conditions aux limites à l'interface sol - atmosphère. Une bonne concordance entre les mesures et les calculs a été obtenue, tant au niveau de la variation de la teneur en eau volumique qu'au niveau du tassement correspondant. Ceci montre la pertinence de l'approche numérique adoptée.

## REFERENCES

- Biddle P.G. 1998 Tree root damage to buildings, Volume 2, Patterns of soil drying in proximity to trees on clay soils
- Feddes R. A., Kowalik P. J., Kolinska-Malinka K. & Zarandy, H. 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *Journal of Hydrology*, 31, No. 1-2: 13-26
- Feddes, R. A., Kowalik, P.J. & Zarandy, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, The Netherlands.
- Gatmiri B. 1997.a, "Effect of nonlinearity in thermohydrromechanical coupling", XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, September 6-12, at Hamburg.
- Gatmiri B., Delage P. and Fry J. J. 1997a. "Numerical Aspects Of Thermoelastoplastic Behaviour Of Saturated Soil", NAFEMS World congress '97, Stuttgart, April 9-11,
- Gatmiri B., Hoor A, 2007 "Excavation effect on the thermo-hydro-mechanical behaviour of a geological barrier", *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol 32, Issues 8-14, 947-956.
- Gatmiri B., M. Seyedi, P.Delage and J.J. Fry 1997b. A new suction-based mathematical model for thermohydrromechanical behaviour of unsaturated porous media", NUMOG VI.
- Gatmiri, B. 1997b. Analysis of fully coupled behaviour of unsaturated porous media under stress, suction and temperature gradient, Final report of CERMES-EDF, France.
- Gatmiri, B., Arson C. 2008. "θ-STOCK, a Powerful tool of unsaturated porous media", *Computers and Geotechnics*, 35, 6, pp 89-915.
- Gatmiri, B., Jenab-Vossoughi, B. & Delage P. 1999. Validation of θ - STOCK, a finite element software for the analysis of thermo-hydro-mechanical behaviour of engineered clay barriers. *Proceedings of NAFEMS WORLD CONGRESS 99 on Effective Engineering Analysis*, Vol. 1: 645-656.
- Gatmiri, B., Jenab-Vossoughi, B. 2002. Effects of heat convection and phase changes on heat and fluid transfer in unsaturated porous media, *Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002*, Recife, Brasilia, 10-13 March 2002, pp. 77-82.
- Hayhoe, H.N. & R. De Jong 1988. Comparison of two soil water models for soybeans. *Can. Agric. Eng.* 30:5-11.
- Hemmati S., Gatmiri B., 2008. Numerical modelling of tree root-water-uptake in a multiphase medium. *Proceeding of E-UNSAT 2008*, Durham, UK, July 2-4 2008 pp.785-790
- Hemmati S., Gatmiri B., Azari B. 2008. Numerical modelling of the soil moisture changes due to soil-atmosphere interaction. *Proceeding of E-UNSAT 2008*, Durham, UK, July 2-4 2008 pp.791-797
- Indraratna, B., Fatahi, B. & Khabbaz, H., 2006. Numerical analysis of matric suction effects of tree roots. *Geotechnical engineering* 159, Issue GE2:77-90
- Landsberg, J. J. 1999. *Tree Water Use and its Implications in Relation to Agroforestry Systems*. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC), Kingston, Australia, pp. 1-24, Water and Salinity Issues in Agroforestry No. 5, RIRDC Publication No. 99/37, RIRDC Project No. CSM-4A
- Li, K.Y., Bisvert B.J. & De Jong., R. 2001. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. *J. Hydrol.*, 252: 189-204
- Nimah, M.N. & Hanks, R.J. 1973. Model for estimating soil water plant, and atmospheric interrelations. I. Description of sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37: 522-527.
- Philip, J.R. & de Vries, D.A. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 38: 222-232.
- Prasad, R. 1988. A linear root-water-uptake model. *J. Hydrol.* 99: 297-306
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., Simunek, J., 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sc. Soc. Am.* 65, 1027-1037.