

Modélisation des transferts thermique et massique dans un milieu poreux non saturé : Application au dessalement des sols.

Meriem ADALA^{1,2*}, Rachid BENNACER¹, Habib SAMMOUDA², Amenallah GUIZANI²

¹Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, 5 Mail Gay Lussac-95031, Neuville sur Oise

²Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique, Campus Universitaire-2092, El Manar II

* (auteur correspondant : meriem_adala@yahoo.fr)

Résumé - Afin de lutter contre la salinisation des sols une nouvelle technique de dessalement a été mise en place. Cette méthode est dite technique d'Evapo-Drainage (**TED**). L'objectif du présent travail est d'étudier l'évolution temporelle du transfert de la chaleur et de la masse dans le milieu poreux non saturé. L'étude numérique proposée est basée sur un modèle du laboratoire. Le domaine (sol) est alors soumis à une température uniforme qui varie sinusoidalement dans le temps sur sa face supérieure ainsi qu'une irrigation modulée afin de suivre au cours du temps les transports de l'eau liquide, de vapeur et de soluté. La modélisation numérique est basée sur la méthode des éléments finis suivi d'un traitement en langage MATLAB. Les résultats obtenus sont validés par les solutions analytiques pour des configurations simplifiées.

Nomenclature

c : la concentration des solutés, $kg.m^{-3}$	T : la température dans le milieu, K
C_{eq} : la capacité spécifique effective thermique, $J.K^{-1}.m^{-3}$	ρ : la masse volumique, $kg.m^{-3}$
D_{vg} : coefficient de diffusion de vapeur dans le gaz, $m^2.s$	η : la viscosité, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
D_{sl} : coefficient de diffusion dispersion du soluté, $m^2.s$	λ_{eq} : la conductivité thermique équivalente, $w.m^{-1}.K^{-1}$
k_r : la perméabilité relative, m^2	θ_s : la teneur en eau à saturation
k_s : la perméabilité à saturation, m^2	θ_r : la teneur en eau résiduelle
L_v : la chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$	Ω : la tortuosité de la vapeur d'eau
p : la pression, Pa	g : l'accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
q : le flux, $m.s^{-1}$	n, l, m : paramètres de van Guenuchten
S_{lv} : le flux de changement de phase, $kg.m^{-3}.s^{-1}$	Indices
R : coefficient de sorption	c : capillaire
R_l : la réaction de dissolution dans le liquide, $kg.m^{-3}.j^{-1}$	l : liquide
R_s : la réaction de cristallisation de sels dans la phase solide, $kg.m^{-3}.j^{-1}$	g : gaz
	v : vapeur

1. Introduction

L'accumulation des sels à proximité des racines des plantes est le risque majeur de l'évaporation excessive à la surface du sol sec et salin. Plusieurs études ont abordé la prédiction du transport et la migration dans la zone saturée des sels solubles dans l'eau. Mais peu d'auteurs se sont préoccupés d'analyser le problème du transfert "couplage thermo-hydro-

salin" dans les milieux poreux non saturés. On citera les travaux de Nasser *et al.* [1] qui ont fait une description des transferts simultanés de chaleur d'eau et de soluté dans un milieu poreux non saturé en présence de gradient de température, de pression matricielle, de pression osmotique ainsi que de la concentration de soluté. Ragab *et al.* [2] ont fait une simulation de lessivage d'une parcelle de blé d'hiver argileuse et drainée pour une saison en utilisant le modèle de SOILN. En adoptant une nouvelle méthode d'absorption des sels via une colonne de capture des sels, Abe *et al.* [3] ont proposé d'introduire la section inférieure de la colonne dans le sol saturé tout en gardant la section supérieure au dessus de la surface. Cette technique a permis de créer une nouvelle surface, à savoir, l'interface entre la colonne et le sol. Les résultats obtenus ont montré que, malgré la petite surface du sol occupée par la colonne de capture, cette dernière a une grande intensité d'évaporation. L'accumulation des sels dans cette zone est significative. Sinha *et al.* [4] décrivent une méthode qui agit sur l'accélération de l'évaporation par introduction de plusieurs colonnes dans le sol saturé en eau saline afin d'éliminer les sels accumulés dans la zone racinaire. Le présent travail est une simulation bidimensionnelle de transports de chaleur et de masse lors de dessalement du sol salin et sec par évapo-drainage dans le cas d'une irrigation par l'eau distillée.

2. Description générale de la technique d'évapo-drainage

La technique d'Evapo-Drainage est relativement récente. Elle consiste à implanter des colonnes dans le sol à dessaler, et ensuite arroser la surface du sol par de l'eau distillée (Figure 1). Ces colonnes sont conçues de matériaux qui accélèrent l'évaporation, ce qui entraîne l'accumulation des sels, notamment, aux alentours de ces colonnes qui seront ensuite éliminés.

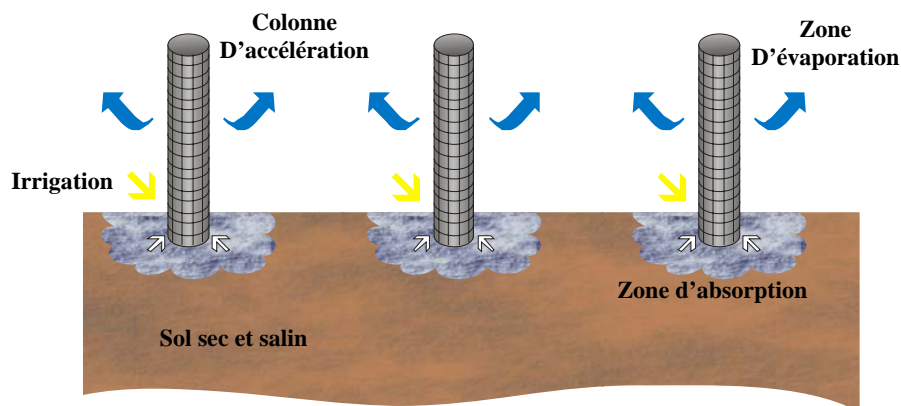


Figure 1: Principe d'évapo-drainage

3. Simulation numérique¹

3.1. Formulation mathématique du modèle

Le modèle mathématique [7] formulé ci-dessous décrit le transport de l'eau liquide, de la vapeur et de la chaleur dans un milieu poreux non saturé. Le modèle est constitué de cinq équations couplées ; à savoir, les équations de conservations des masses des phases liquide, gazeuse, vapeur et solide ainsi que l'équation de la conservation d'énergie.

¹ 2-D (COMSOL)

Les mécanismes responsables du déplacement de l'eau liquide et vapeur au sein de ce milieu sont la convection au sein de la masse liquide et la convection, diffusion et dispersion de la vapeur au sein de la masse gazeuse. On néglige la dispersion dans la phase gazeuse et la dépendance en température des densités et des viscosités dynamiques de l'eau et du gaz. Ces équations mettent en évidence les mécanismes responsables du déplacement des différents fluides ainsi que transfert de chaleur au sein de ce milieu poreux non saturé. Les phénomènes mis en jeu dans cette modélisation pour chaque grandeur consistent :

- la masse d'eau se déplace sous l'effet de l'infiltration gravitationnelle en plus d'un gradient de pression capillaire résultant des gradients d'humidité et de température dans le sol,
- la vapeur se transporte par convection dans la phase gazeuse et par diffusion suivant la loi de Fick
- les solutés se déplacent par convection, dispersion-diffusion des sels dans la phase liquide avec un terme de précipitation-dissolution,
- la chaleur est transférée par conduction selon la loi de Fourier, et par convection en plus de la chaleur latente de changement de phase.

L'équation de conservation de la masse de l'eau liquide

$$\frac{\partial (\rho_l \theta_l)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_l \vec{q}_l) - S_{lv} \quad (1)$$

Le flux de la phase i (liquide ou gaz) est exprimé par la loi de Darcy :

$$\vec{q}_i = -\frac{kr_i k_s}{\eta_i} (\vec{\nabla} p_i + \rho_i \vec{g} e_z) \quad (2)$$

L'équation de continuité de masse pour la phase gazeuse globale

$$\frac{\partial (\rho_g \theta_g)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{q}_g) + S_{lv} \quad (3)$$

L'équation de conservation de l'énergie

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot [-\lambda_{eq} \vec{\nabla} T + \rho_l c_{pl} (\vec{q}_l + \vec{q}_v) T + \rho_l L_v S_{lv}] \quad (4)$$

L'équation de continuité de masse de la vapeur d'eau

$$\frac{\partial (\rho_v \theta_g)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_v \vec{q}_g + \theta_g \vec{J}_{dv}) + S_{lv} \quad (5)$$

L'équation de conservation de la masse solide

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\theta_l c_l + \rho_s c_s)] = -\vec{\nabla} \cdot [-\theta_l D_{sl} \vec{\nabla} c_l + c_l \vec{q}_l] + R_l + R_s \quad (6)$$

Avec :

$$\vec{J}_{dv} = -\frac{D_{vg}}{\Omega} \vec{\nabla} \rho_v \quad \text{et} \quad c_s = Rc$$

3.2. Conditions aux limites et initiales

Le tableau 1 résume les conditions initiales utilisées.

VARIABLES	Description	Valeurs
p_l	Pression de l'eau liquide, Pa	-1E5
p_G	Pression de gaz, Pa	Pression atmosphérique
T	Température de la source chaude, K	T_{moy}
ρ_v	Densité de vapeur, mol.m ⁻³	0
C	Concentration dissoute, kg.m ⁻³	40

Tableau 1: conditions initiales

On suppose que les parois verticales de gauche et de droite, respectivement, sont adiabatiques et imperméables. On impose un flux d'irrigation, une température sinusoïdale et une concentration nulle à la surface de domaine. On impose au niveau de l'accélérateur une température sinusoïdale et une concentration de soluté égale à vingt pourcent de la concentration totale initiale et une densité de flux égale au double de la condition initiale. En bas on impose un flux de drainage qui importe avec lui vingt pourcent de la concentration initiale de soluté.

Le tableau 2 donne une aperçue sur les valeurs des grandeurs thermo-physiques utilisés lors de la simulation

	ρ	k_s	θ_s	θ_r	λ	n, l, m	c_{pl}, c_{pg}, c_{ps}
	$Kg.m^{-3}$	m^2			$J.kg^{-1}.K^{-1}$	-	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Eau liquide	1000	0.1	0.43	0.045	0.2		4182
Gaz	1.28				0.25		3000
Grains solides	1400				0.35	2.8, 11, 0.5	890

Tableau 2: Les valeurs des grandeurs thermo-physiques des fluides

3.3. Résultats

Nous présentons ci-dessous la variation des perméabilités relatives de l'eau et du gaz en fonction de la teneur en eau (figure2) ainsi que la variation de la température et de la densité de vapeur en fonction du temps.

En effet, le transport de l'eau liquide et celle de la vapeur sont étudiées séparément, bien que ces transports se fassent simultanément et qu'ils soient couplés par le terme source qui apparait dans les équations. A l'état initial la teneur en eau dans le sol est uniforme. Au début de l'irrigation c'est l'effet de la gravité qui va l'emporter causant la percolation de l'eau jusqu'au fond du domaine. L'accroissement du gradient de pression matricielle va permettre la retenue de l'eau et le passage d'un état non saturé vers un état saturé. La première figure montre que les deux fluides (eau et gaz) se comportent des manières opposées au sein de notre sol.

Comme le domaine est soumis en plus de l'irrigation à une modulation en température sur la face supérieure, la chaleur se propage par conduction (matrice solide) et par convection (eau d'irrigation). La propagation de l'onde de chaleur imposée à la surface évolue en profondeur. La variation de la température au cours du temps est représentée sur la figure 3. Le présent résultat est obtenu pour le cas où l'évaporation n'a pas encore eu lieu. Une atténuation et un accroissement de déphasage apparaîtra avec la profondeur.

Le gradient pression partiel couplé à la température va induire une évaporation d'eau (changement de phase) qui va engendrer un flux de vapeur traversant les pores du sol contenant de l'air. La vapeur d'eau condensera lors de son mouvement ascensionnel si des conditions de refroidissement y sont appliquées (soir). Après la condensation de la vapeur le gradient de la pression totale peut transporter l'eau de la zone froide vers la zone chaude (figure3). Les matériaux constituant les accélérateurs font favoriser l'évaporation surtout au niveau de la zone du domaine les entourant (15 cm) comme le montre la figure 4.

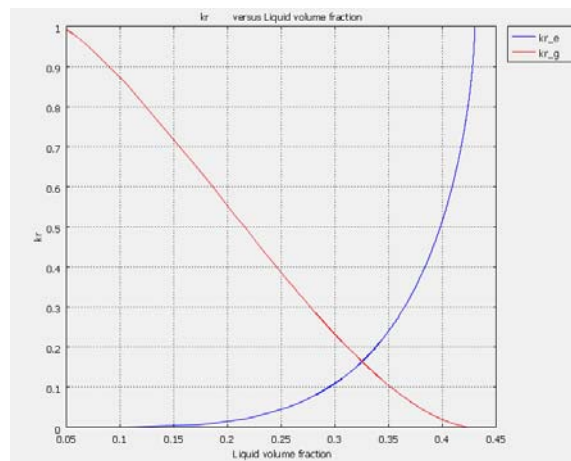


Figure2 : Les perméabilités relatives de l'eau liquide et du gaz

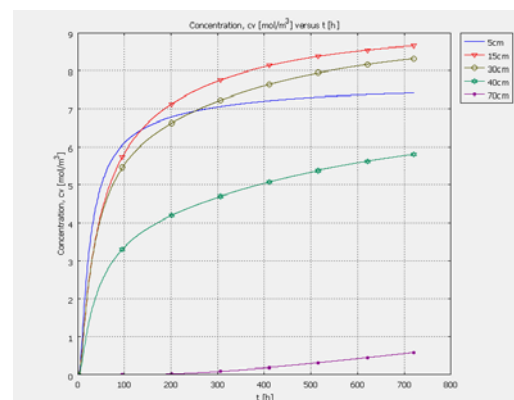
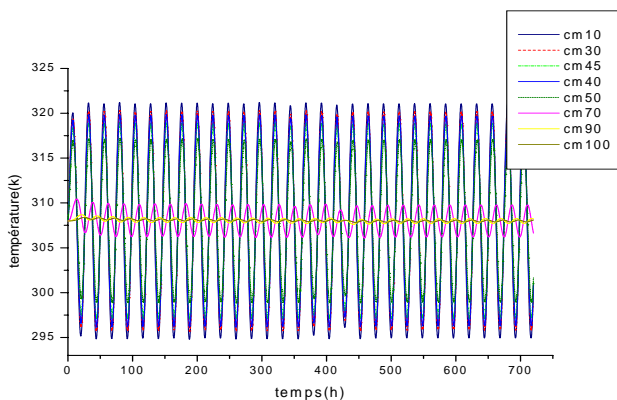


Figure 3 : les isothermes en fonction du temps

Figure4 : L'évolution temporelle de la vapeur

4. Conclusion

Notre simulation numérique a permis d'étudier et d'évaluer les évolutions des transports d'eau liquide, d'énergie et de soluté, dans un milieu poreux non saturé et homogène, pour décrire le phénomène de dessalement de sol par la technique d'Evapo-Drainage. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de cette méthode. En effet, la source de chaleur attire les sels, dans la zone proche des colonnes accélératrices qui vont jouer le rôle des drains de soluté par évaporation.

Références

- [1] I.N.Nasser and Robert Horton; Heat, water and solute transfer in unsaturated porous media: water and solute transfer in unsaturated porous media: I-theory development and transport coefficient evaluation, *Transport in porous media* 27 (1997), 17-38
- [2] R.Ragab, D.M. Cooper, G.Lharris, J.A.Catt; Simulating nitrate leaching under winter wheat grown on a structured clay soil considering by pass flow, *journal of hydrology* 182 (1996), 157-173
- [3] Y. Abe, Jun Tsurui, Tomoharu Yamaguchi, Yoshiyuki Ohtsuka and Hiroyuki; Evaporation effect of a salt Capturing Stick and its Influence on Movement of Solution and Solute soil, *journal of arid lands studies* 5 (1995), 43-54
- [4] S.Sinha, T.Matsumoto, Y.Yanak, J.Ishida, T. Kojima, S.Kumar, Solar desalination of saline soil for afforestation in arid areas: numerical and experimental investigations, *Energy conversion and management* 43 (2002), 15-3
- [5] M. Hami, K.Gueraoui, A. Hammoumi, and G.zeggawagh; Modélisation numérique unidimensionnelle de transport de soluté dans un milieu poreux non saturé, *journal of hydraulic researches* 39(2001)
- [6] J.Grifoll, J.Gasto, Y.Cohen, Non isothermal soil water transport and evaporation, *advances in water resources*, *advances in water resources* 28 (2005), 1254-1266