

Prise en compte de l'interaction sol-atmosphère-structure dans l'analyse des désordres liés à la sécheresse

A. AI QADAD, I. SHAHROUR

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE)
Université Lille1, 59 650 Villeneuve d'Ascq, France

Résumé :

On présente une étude numérique des désordres induits par la sécheresse en prenant en compte l'interaction sol-atmosphère-structure. L'analyse s'appuie sur une modélisation de transfert de masse et de chaleur dans les sols non saturés en prenant en compte l'échange sol-atmosphère. L'influence de la sécheresse sur les structures est étudiée à l'aide d'une approche découplée. La succion induite par la sécheresse est d'abord déterminée. Ensuite, une modélisation par éléments finis est utilisée pour analyser la réponse mécanique du système sol-structure. L'analyse montre que l'échange sol-atmosphère induit des efforts combinés dans la fondation. La partie supérieure de la fondation est mise en traction alors que la partie inférieure est mise en compression.

Abstract :

This paper presents a numerical study of the disorders induced by the drought in considering the atmosphere-soil-structure interaction. The study is based on a modeling of the transfer of mass and heat in unsaturated soil taking into account the ground-atmosphere exchange. The influence of the drought on the structures is studied using an uncoupled approach. The suction induced by the drought is firstly determined. Then, a finite elements modeling is used to analyze the mechanical response of the soil-structure system. Analysis shows that the soil-atmosphere interaction induces combined internal forces in the foundation with extension stresses in the upper part of the foundation and compression in the lower part.

Mots clefs: atmosphère, désordres, interaction, sécheresse, sol, structure

1 Introduction

L'interaction sol-atmosphère peut induire un changement important de l'état hydrique dans les sols, avec dans certains cas des conséquences graves pour les structures. Ces désordres sont observés lors des phénomènes de gonflement et de dessiccation, notamment pour les structures légères [1]. Il est par conséquent important de prévoir dans les zones à risque les profils hydriques induits par les conditions climatiques et plus particulièrement au voisinage des structures. Ces prévisions permettent de prendre en compte le phénomène de gonflement/dessiccation dans la conception et le dimensionnement des ouvrages.

Cette communication présente une analyse à l'aide d'un modèle numérique couplé de l'influence de la présence d'une structure sur la succion induite par l'échange hydrique sol-atmosphère. L'analyse est effectuée par la méthode des éléments finis. Le modèle numérique prend en considération dans le même calcul l'écoulement dans les sols non saturés et l'échange sol-atmosphère. Après une présentation du modèle numérique, on présente son application à l'étude des déformations et contraintes induites dans une structure par l'échange sol-atmosphère enregistré dans une zone aride.

2 Modèle numérique

L'analyse est effectuée à l'aide d'une approche découplée par éléments finis. Dans un premier temps, on détermine la succion induite par la sécheresse par la résolution du problème de transfert d'eau dans le sol non saturé couplé au couplage sol-atmosphère. Ensuite, on utilise la méthode des éléments finis pour déterminer la réponse mécanique de l'ensemble sol-structure au champ de succion déterminé lors de la première phase.

Les déformations dues à la succion sont calculées en élasticité en utilisant la méthode de Fredlund et al. [2] :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(1 + \mu)(\sigma_{ij} - u_a)}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_{kk} - 3u_w)\delta_{ij} + \frac{(u_a - u_w)}{H}\delta_{ij} \quad (1)$$

H : modèle d'élasticité de sol lié à la succion

E : modèle d'élasticité de sol lié aux contraintes

Cette expression comporte trois termes, les deux premiers (ε^m) concernent les déformations liées à la variation de contraintes ; le dernier terme (ε^s) concerne le changement de volume dû à la succion ($u_a - u_w$).

Afin de prendre en compte le comportement élastoplastique des sols, l'expression (1) peut être écrite sous la forme :

$$\varepsilon^t = \varepsilon^m + \varepsilon^s \quad (2)$$

Les déformations (ε^m) sont composées de deux parties : élastique (ε^e) et plastique (ε^p) :

$$\varepsilon^m = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3)$$

L'application du principe de travaux virtuel au système sol-structure et une discrétisation par éléments finis conduisent à l'équation d'équilibre suivante :

$$\int {}^t B \sigma d\Omega = F_{ext} \quad (4)$$

F_{ext} : vecteur de forces extérieures

B : matrice gradient des déformations

Selon la loi de Hooke on a :

$$\sigma = c \varepsilon^e \quad (5)$$

Cette équation peut s'écrire par l'équation suivante :

$$\sigma = c (\varepsilon^t - \varepsilon^p - \varepsilon^s) \quad (6)$$

Le report de l'équation 6 dans l'équation 4 donne:

$$\int {}^t B C \varepsilon^t d\Omega = \int {}^t B C (\varepsilon^p + \varepsilon^s) d\Omega + F_{ext} \quad (7)$$

qui s'écrit sous la forme

$$R.U = F + F_{ext} \quad (8)$$

$$F = \int {}^t B C (\varepsilon^p + \varepsilon^s) d\Omega \quad (9)$$

La résolution de l'équation 8 donne le champ de déplacements et par la suite le tenseur des déformations. L'incrément de contrainte est déterminé par l'intégration de la loi de comportement. La loi de comportement donne également les déformations plastiques. Un processus itératif est utilisé pour assurer l'équilibre et le respect de la lois de comportement.

3 Application

3.1 Présentation de l'exemple

La figure 1 illustre l'exemple traité qui concerne une structure de 10 m de largeur sur un massif de sol de 3 m de hauteur. La structure correspond à une frontière imperméable sans aucun échange avec l'atmosphère.

Les courbes de rétention d'eau et de perméabilité sont présentées sur les figures 2 et 3. Le comportement du massif est supposé élastique avec un indice de changement du volume $C_m = 0,0085$, un coefficient de Poisson $\nu = 0,3$ et un indice de vide initial $e = 1,0$. Le comportement de la fondation est supposé élastique avec un module de Young $E = 10$ GPa.

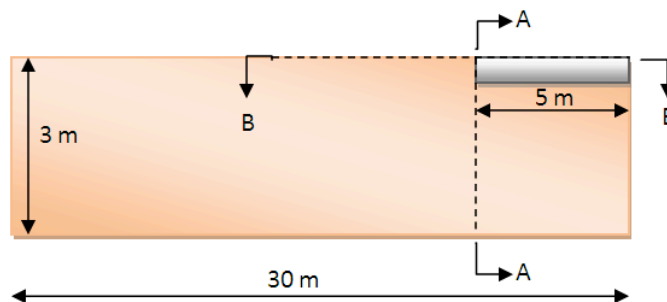


Figure 1. Problème étudié

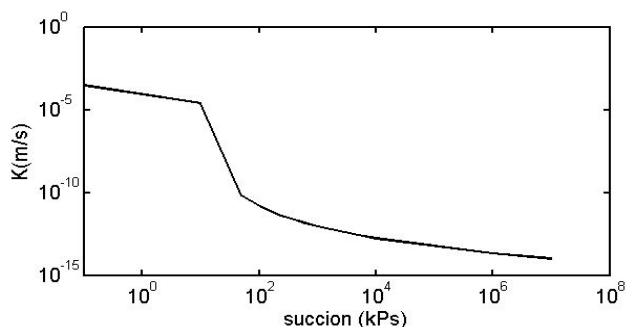


Figure 2. Variation de la perméabilité avec la succion

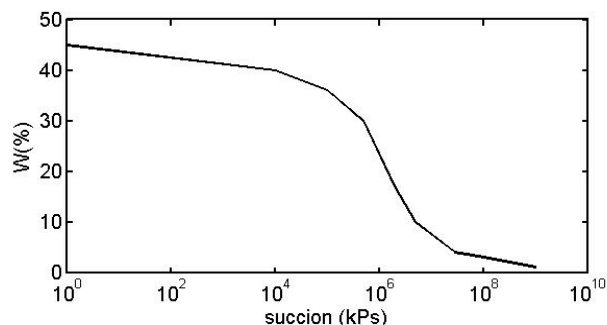


Figure 3. Courbe de rétention d'eau

3.1 Analyse des résultats

La figure 4 illustre les conditions climatiques utilisées dans l'analyse. Ces conditions ont été enregistrées au mois de juin 2005 sur un site au sud de la Syrie. La figure 5 présente l'évolution de la succion à la surface de sol [3]. On note que la présence de la structure induit un changement important de la succion dans les zones situées au bord de la structure : la succion au voisinage extérieur de la structure est de l'ordre 10^{+5} kPa à comparer avec la succion en dessous de la structure qui est de l'ordre 10^{+2} kPa. La figure 6 montre la distribution de la succion après 28 jours. On remarque une forte influence de la présence de la structure sur la succion de son voisinage la structure. On note que la valeur de la succion est significative jusqu'à 70 cm de profondeur ($1.6 \cdot 10^{+5}$ kPa à la surface et 60 kPa à 80 cm de profondeur).

La figure 7 illustre l'évolution du tassement à la surface du sol (section B-B). On note la présence de trois zones :

- la première se trouve sous la fondation avec un tassement inférieur aux autres zones et un profil proche de celui d'un corps rigide avec un tassement au centre accompagné d'une rotation.
- La seconde zone correspond à une zone transition où le tassement augmente rapidement en s'éloignant de la fondation (fort gradient).
- La troisième zone couvre une partie de la surface libre avec un tassement quasi uniforme. Après 28 jours, le tassement dans cette zone atteint 2,3 cm à comparer avec le tassement sous la fondation qui atteint 1,4 cm.

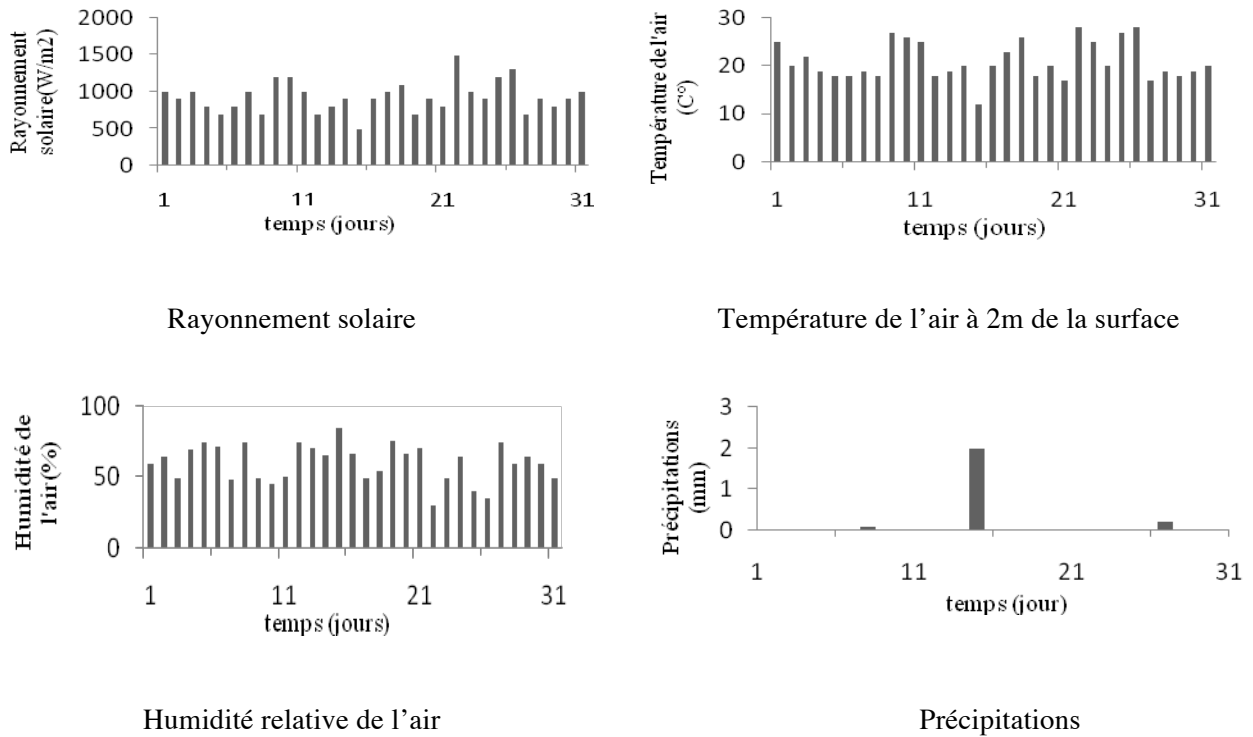


Figure 4 : Conditions climatiques retenues dans l'analyse
Enregistrement du mois de juin dans un site situé au sud de la Syrie

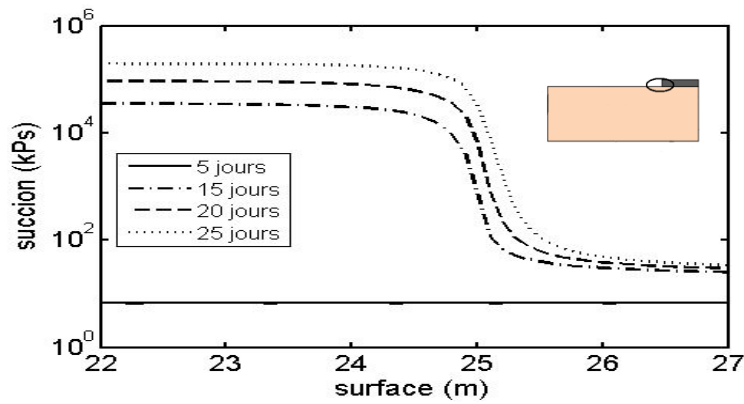


Figure 5. Variation de la succion en surface du sol avec structure

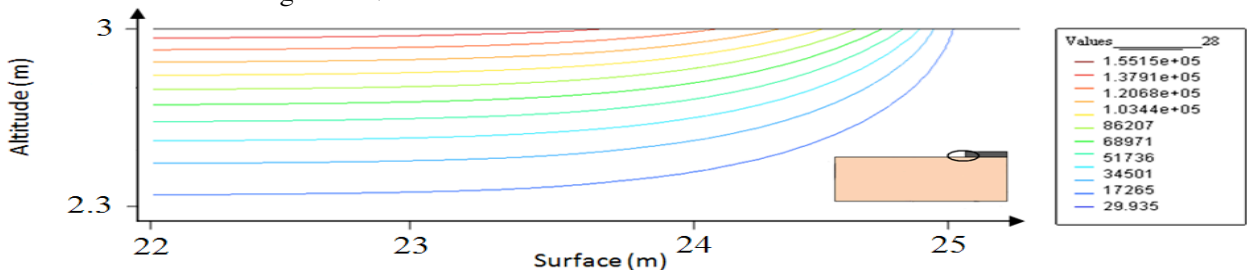


Figure 6. Variation de la succion au voisinage de la structure

La figure 8 montre les courbes de niveau du déplacement vertical après 24 jours. On note que ce déplacement est concentré dans la partie supérieure du massif et à l'extérieur de la fondation. Une zone de fort gradient se trouve autour du côté latéral de la fondation. Ceci indique la présence de fortes déformations dans cette zone. La figure 9 illustre l'évolution de la contrainte latérale à la surface. On note la présence des contraintes de traction avec une forte concentration sous la fondation. Cette concentration est due à la rigidité

élevée de la fondation par rapport à la rigidité du sol. La contrainte au centre de la surface supérieur de la fondation atteint 2MPa après 28 jours. A noter que la contrainte latérale dans le sol est très faible. Les figures 10 et 11 illustrent les variations de l'effort normal et du moment fléchissant dans la fondation. On note que la succion induit un effort normal qui croît en partant du coin de la fondation vers son centre. Cet effort augmente avec le temps. Il atteint 130kN au centre de la fondation après 28 jours. Le moment fléchissant varie d'une manière similaire à l'effort normal. Il atteint 18 kN.m au centre de la fondation après 28 jours.

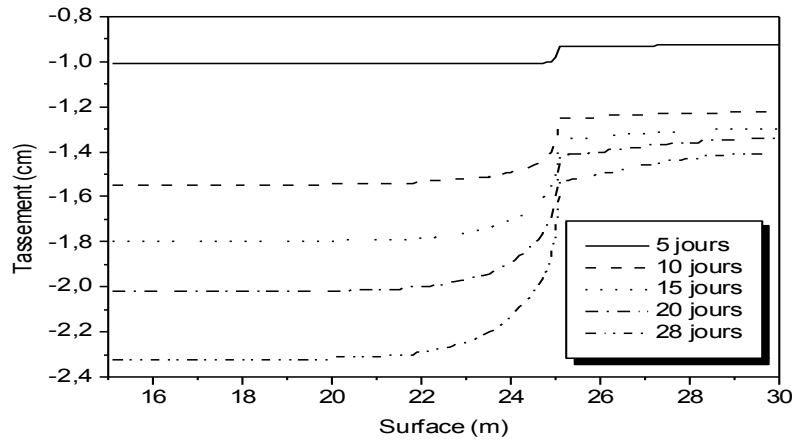


Figure 7 Evolution du tassement à la surface du sol (section B-B)

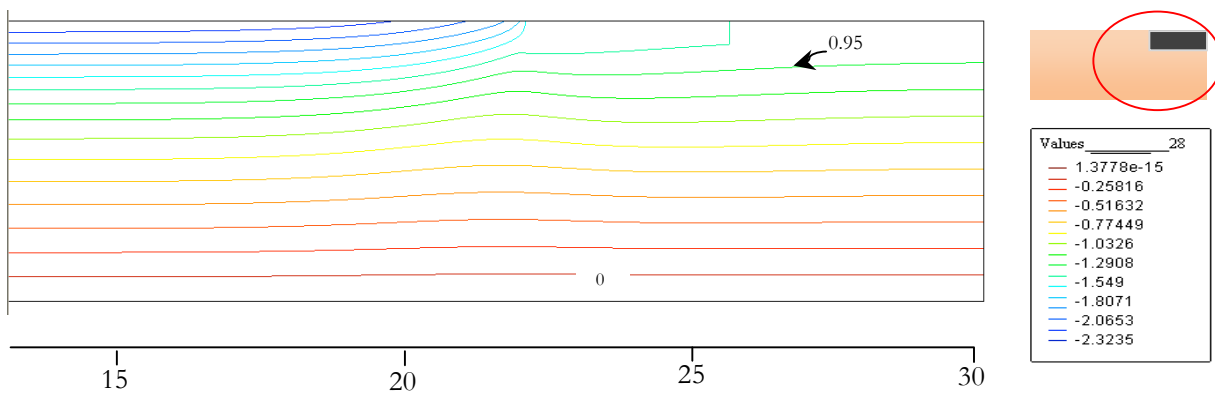


Figure 8 Niveaux de tassement après 24 jours

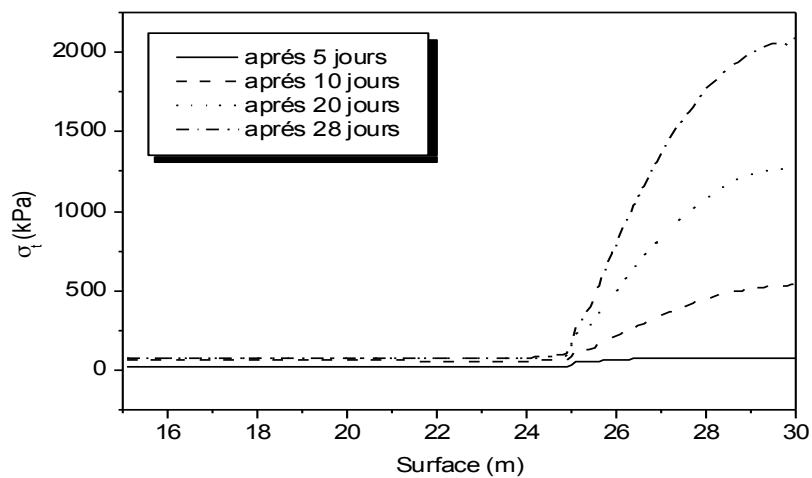


Figure 9: Contrainte latérale induite à la surface

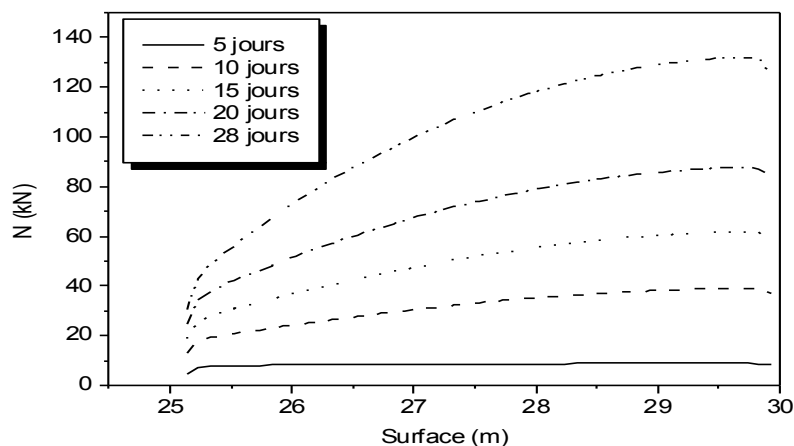


Figure 10 Effort normal induit dans la fondation

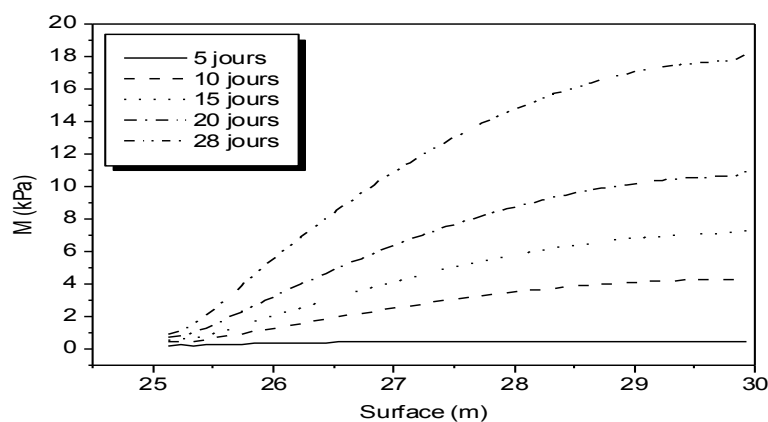


Figure 11 : Moment fléchissant induit dans la fondation

4. conclusion

Cette communication a comporté une analyse de l'influence de l'échange sol-atmosphère sur l'interaction sol-structure. L'analyse a été réalisée à l'aide d'une modélisation par éléments finis qui intègre l'écoulement dans les sols non saturés et l'échange sol-atmosphère. L'analyse montre que la présence d'une structure affecte d'une manière significative l'évolution et la distribution de la succion dans son voisinage. L'analyse de l'interaction sol-structure sous l'effet de la sécheresse montre la présence des zones avec des tassements quasi-uniformes : sous la partie centrale de la fondation et à l'extérieur de la fondation. Dans la zone de transition entre ces deux zones, on note un fort gradient de tassement (donc une concentration des déformations). On note que la succion induit des efforts combinés dans la fondation avec un effort normal de compression et une flexion. La partie supérieure de la fondation est mise en traction alors que la partie inférieure est mise en compression.

5. Références bibliographiques

- [1] Blight G. E. Interactions between the atmosphere and the Earth, Geotechnique, vol. 47, no 4, pp. 715-767, 1997.
- [2] Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, Canada, 1993.
- [3] A. Al Qadad, I. Shahrour, M. Rouainia. Influence de la présence d'une structure sur la succion induite par l'échange sol-atmosphère, 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 août 2009.