
The unsaturated Elastoplastic modelling for the slope's instability prediction

Mehrez Jamei* — Houda Guiras* — Sebastia Olivella**

* Civil Engineering Laboratory, National Engineering School of Tunis (ENIT), B.P. 37, Le Belvédère Tunis, Tunisia, mehrez.jamei@enit.rnu.tn, houguiras@yahoo.fr

** Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, sebastia.olivella@upc.edu

RÉSUMÉ : Le développement des résultats de la recherche en mécanique des sols non saturés est resté limité à l'étude du comportement à l'échelle du laboratoire. Rares sont les modèles en non saturé qui sont implémentés dans des codes de calcul pour le calcul des ouvrages. Le modèle le plus connu est celui basé sur le concept des contraintes effectives. Or, ce type de concept ne permet pas de prédire d'une manière réaliste l'effet des chemins d'humidification et de drainage. Entre autres, les phénomènes les plus importants qu'il faut intégrer sont principalement le gonflement et l'effondrement. Comme cas d'application on a choisit dans cette étude l'examen de stabilité d'un talus sous sollicitations hydriques. On montre comment l'évolution importante de la saturation des couches supérieures conduit à des effondrements localisés et donc à une accélération du glissement.

ABSTRACT: The developments of researches for unsaturated soil mechanics are still limited to the studies of the soil behaviour at laboratory scale, and not extended to the calculation of some practical applications. Rarely in which, are the unsaturated models implemented in computing codes for project design. The most known model is the one based on effective stress concept. However this type of concept doesn't allow the prediction in a realistic manner the effects of wetting and drying paths. In addition, the most important phenomena, which should be included, are mainly swelling and collapse. As an application case we have chosen in this study the examination of slope stability under hydraulic solicitations. We analyse this occurred slope's instability under rainfall. We show that the evolution of saturation in the top layers leads to local collapses and hence induce the acceleration of sliding.

MOTS-CLÉS: sol non saturé, stabilité de talus, humidification, drainage, modèle élastoplastique
KEY WORDS: unsaturated soil, slope stability, wetting, drying, elastoplastic model

1. Introduction

La plupart des problèmes en géotechnique sont conditionnés par les effets de couplage entre les déformations de la matrice solide (arrangement des grains) et écoulements des fluides (eau et air). Ceci est le cas en particulier des ouvrages en zone non saturée (digues de barrages en terre, talus, fouilles en masse, remblais routiers, couches de couverture des décharges des déchets domestiques ou industriels).

Ce type de problèmes concerne la région du Nord Ouest de la Tunisie qui est une des régions caractérisée par un relief montagneux qui est constitué par des roches sédimentaires anciennes. Le climat est semi aride assez pluvieux, une moyenne annuelle de 634mm/j, la répartition de la pluie durant une année est très variable, il peut avoir un cumul de 501mm pendant la saison humide (de Septembre à Avril), et de 46mm durant la saison sèche (de Mai à Août). Les températures présentent des écarts intermensuels importants, les valeurs minimales sont souvent proches de zéro pendant les mois les plus froids et peuvent atteindre 30° pour les mois les plus chauds. Ceci revient surtout à l'altitude et à l'éloignement de la mer. La couverture végétale est pauvre dans la plupart des cas. L'érosion hydrique est assez sévère et elle s'accompagne généralement de glissements de terrain. Cette région est par ailleurs traversée par plusieurs cours d'eau d'écoulement torrentiel et saisonnier.

Le gradient thermique et la variation hydrique sont trop décalés entre la saison sèche et humide ce qui engendre fréquemment des désordres sur les sols et les structures du réseau routier de cette région.

Les épisodes de très fortes pluies engendrent de multiples instabilités superficielles et glissements de terrain. Ainsi, une pluie brève et de forte intensité entraînera de nombreux glissements superficiels et des coulées, alors que des pluies d'intensité modérée mais persistant plusieurs semaines sont susceptibles de provoquer des glissements de grande ampleur. Ces glissements qui sont souvent locales entraînent des masses de terre bloquant ainsi la circulation.

Par ailleurs, plusieurs travaux se sont intéressés à ce même type de problèmes pour étudier et expertiser de prêt un certain nombre de cas de glissements de terrain suite à des variations d'état hydrique par humidification qui arrive à la suite d'une période de sécheresse. NG et al. (2003) ont instrumenté un talus artificiel avec des mesures du profil de teneur en eau, de la succion et des déplacements en utilisant des inclinomètres.

Nous retenons l'essentiel des résultats constatés par l'ensemble de ces auteurs qui s'accordent sur le fait que c'est le taux de variation de l'état hydrique et sa cinétique qui ont l'effet direct sur la stabilité de l'ouvrage. Ceci est évidemment tributaire des variations saisonnières, à savoir le processus cyclique de sécheresse et de pluviométrie.

Nous appliquons à cet effet le modèle élastoplastique BBM (CODE BRIGHT-V3, 2002) qui permet sans doute de se rendre compte de la variation hydrique et de l'effet du couplage hydromécanique.

2. Formulation

2.1. Formulation et principe du fonctionnement du modèle BBM

Le modèle BBM (Alonso et Gens 1990) est un modèle élastoplastique qui permet de prédire les déformations volumiques et déviatoriques. Les arguments de la fonction de charge sont les contraintes totales nettes ($\sigma_i - u_a$) et la succion ($u_a - u_w$). Ainsi la surface de charge délimitant la zone élastique est définie par rapport à ces deux arguments et représentée dans la figure 1.

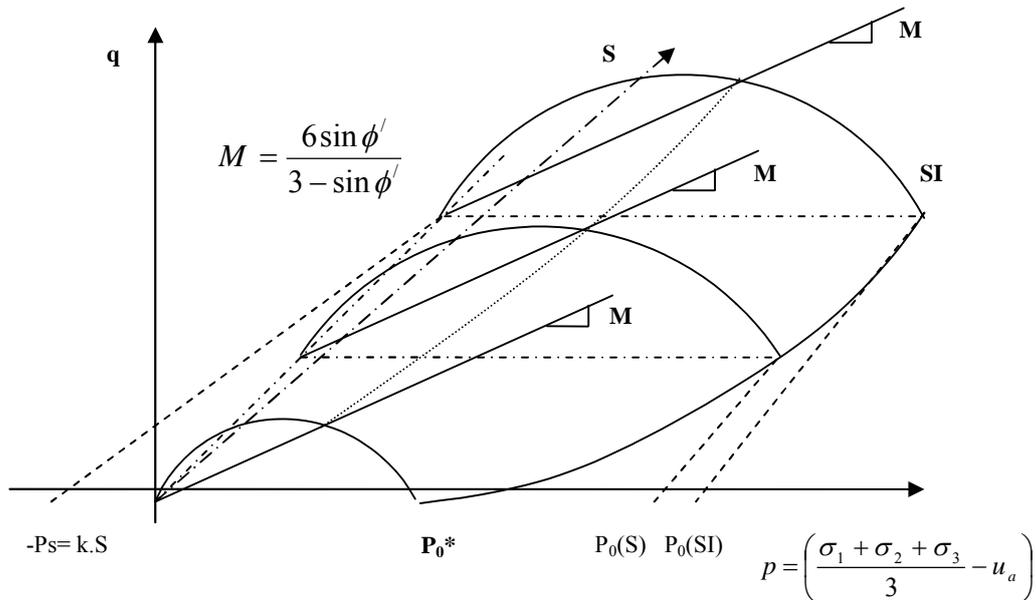


Figure 1. Présentation du modèle BBM dans l'espace (p, q, s) .

La contrainte déviatorique est définie par $q_d = s_1 - s_3$ et $s = u_a - u_w$

$P_s = k \cdot s$ (contrainte moyenne nette de traction). P_s est supposée nulle à la saturation, mais dans la réalité cette condition peut ne pas être satisfaite. L'extension du modèle de base propose l'expression suivante:

$$P_s = P_{s0} + k \cdot s = \frac{k_4}{3} + \frac{k_3}{3} \cdot s \quad ; \quad k_3 = 3k \quad ; \quad k_4 = 3P_{s0} \quad [1]$$

La projection sur le plan (p_0^*, s) donne la représentation suivante (Figure 2).

La projection sur le plan (p_0^*, q) donne lieu aux ellipses caractérisées par deux paramètres essentiels qui sont la contrainte P_s et la contrainte de préconsolidation apparente $P_0(s)$ (contrainte de préconsolidation à succion s donnée): Une variation importante de l'un ou des ces deux paramètres conduit à une modification à la fois de la forme de la surface de charge et de l'étendu du domaine élastique. Le suivi de cette évolution permet de quantifier le mouvement du sol constituant le talus et de localiser les zones où des déformations plastiques apparaissent sous un état de contraintes mécanique donné. Une diminution de la succion conduit à une diminution de la cohésion et de la contrainte de préconsolidation sous l'effet d'un chemin d'humidification à contrainte mécanique constante.

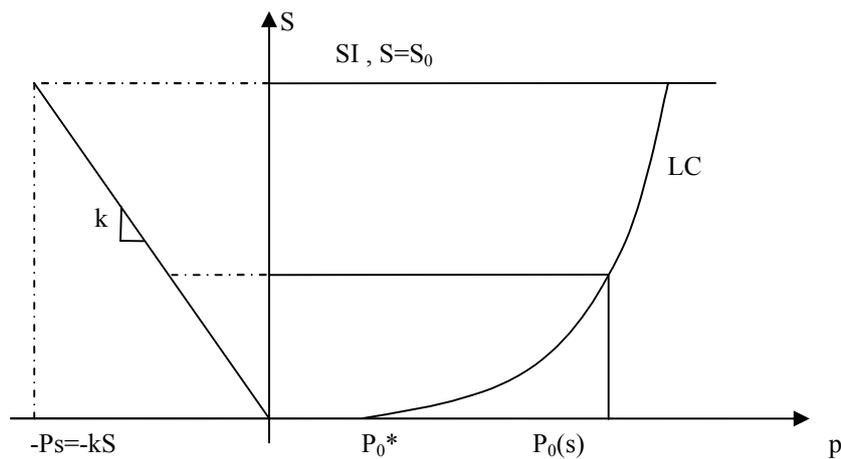


Figure 2. Projection de la surface de charge sur le plan (p, s)

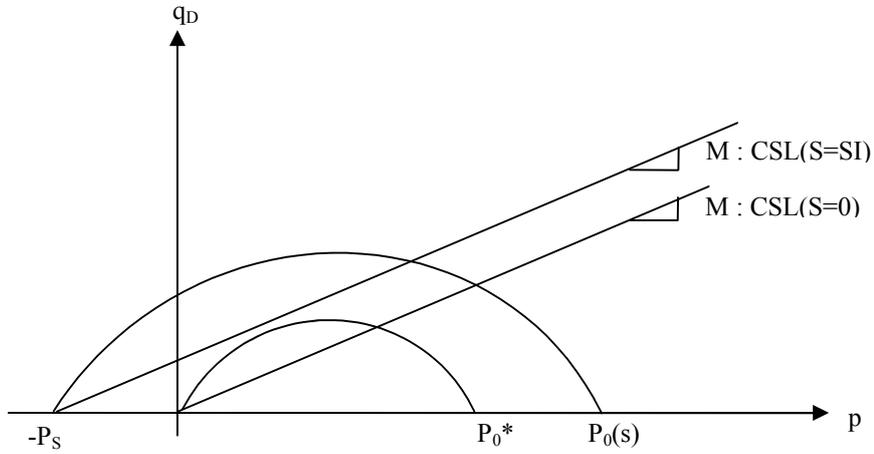


Figure 3. Projection de la surface de charge sur le plan (p, q_d)

Le critère de plasticité de deux surfaces de charge est décrit par les deux équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(p_0^*, q_D, s, p_0) = q_D^2 - M^2(p_0^* + p_s)(p_0(s) - p_0^*) = 0 \quad [2a] \\ f_2 = (S, S_0) = S - S_0 = 0 \quad [2b] \end{array} \right.$$

M : la pente de la ligne d'état critique en fonction de l'angle de frottement interne.

k : la pente de la partie en traction

2.2. Données pour la mise en œuvre du modèle BBM pour l'étude de stabilité du talus

La plupart des données du site ont été déterminées à travers des essais au laboratoire (essais d'identification, granulométrie, essai œdométrique en saturé, essai de perméabilité en saturé, essais en non saturé pour la détermination de la courbe de rétention d'eau), les autres données spécifiques à l'état non saturé et pour lesquels on ne dispose pas de moyens. Pour les identifier, on a procédé à des estimations (Marshall, 1958, Leong et al., 1997, Alonso et al. 1990). Ces méthodes permettent de relier la perméabilité à la courbe granulométrique d'une façon empirique, mais sur la base d'une description structurale de la distribution des dimensions des grains. Des considérations de simplification sont proposées dans le manuel du code-BRIGHT et donc les 11 paramètres du modèle BBM se ramènent à 7 (Tableau ci-dessous). Aussi, à partir de la lithologie transversale et des mesures piézométriques pour déterminer le niveau de la nappe (bien qu'il soit très variable d'une saison à une autre), on s'est fixé pour l'étude la stratification apparente du site suivante (Figure 4).

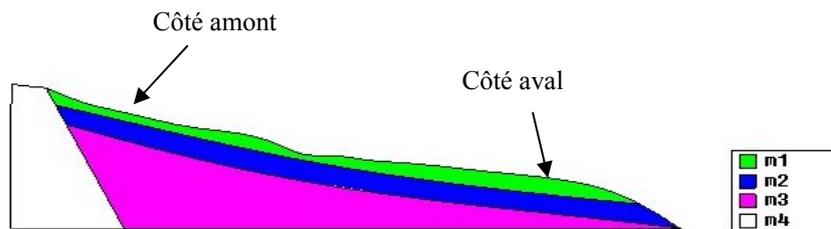


Figure 4. Disposition des couches stratifiées tout au long du talus

Le tableau 1 résume les paramètres mécaniques et hydriques des différentes couches du sol pour l'étude numérique :

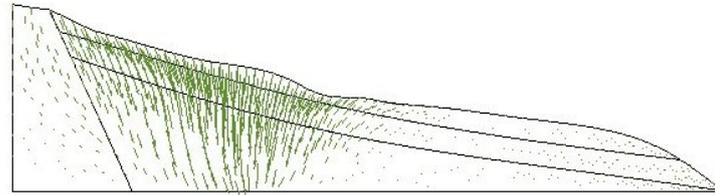
Paramètres	m1	m2	m3	m4
φ' : Angle de frottement effectif interne	15°	15°	10°	30°
M : Pente de la ligne d'état critique	0.6	0.6	0.4	1.2
P_0^* : Contrainte de préconsolidation à la saturation (MPa).	0.07	0.21	0.51	6
P_c : Contrainte de référence	0.025	0.025	0.025	0.025
κ : Coefficient de compressibilité élastique (BBM)	0.07	0.07	0.07	0.07
$\lambda(0)$: Coefficient de compressibilité à l'état saturé (BBM)	0.28	0.28	0.28	0.28
K : Perméabilité intrinsèque (m ²)	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³
n: Porosité initiale	0.5	0.5	0.5	0.4

Tableau 1. Paramètres utilisés pour les simulations numériques

Enfin la courbe de rétention d'eau est aussi déterminée expérimentalement et après ajustée par le modèle de Van Genuchten (1980). Bien évidemment la résolution du problème d'infiltration ou de drainage est régie par les équations de bilan dans la phase eau. Dans l'hypothèse de l'indéformabilité des particules et de la microstructure (plaquettes d'argile: dans le cas où le gonflement est négligé), et pour un état de contrainte mécanique non évolutif, ces équations conduisent à l'équation de Richards (Sahimi, 1995, Smith, 2003).

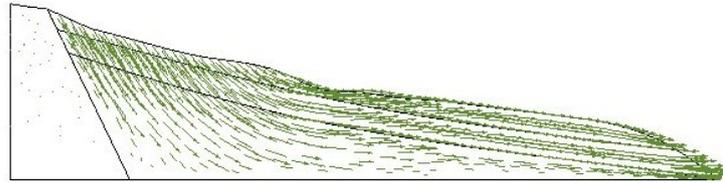
3. Analyse et discussion des résultats des simulations

On montre dans la suite les simulations d'une phase de drainage après 60 jours suivie d'une phase d'humidification correspondante à une pluviométrie pendant trois phases d'intensité journalière moyenne de (2mm/j durant 42jours, 25mm/j durant 4jours et 1mm/j pendant 74jours).



step 60_0284
Display Vectors of Displacements, |Displacements| factor 2000.

Figure 5. Champs de déplacement à la fin de la phase de drainage après 60 jours (la succion appliquée est $s=0.1\text{MPa}$)



step 180
Display Vectors of Displacements, |Displacements| factor 15.

Figure 6. Champs de déplacement à la fin de la phase d'humidification après une saison de 120 jours

La figure 5 montre une tendance de compressibilité verticale après une saison d'évaporation. Cependant la figure 6 montre clairement un mouvement de translation plutôt horizontale sous l'effet d'une humidification et donc d'une saturation progressive. De même l'examen de la figure 7 montre que durant le chemin d'humidification, la cohésion et la contrainte de préconsolidation apparente diminuent suite à une diminution de la succion, par conséquent la résistance au cisaillement diminue et le risque de glissement et d'effondrement local augmentent. La surface de charge délimitant le domaine élastique se trouve réduite et donc les déformations plastiques apparaissent pour un état de contraintes où pour lequel le talus était sensé stable. C'est d'ailleurs, pour cela que l'analyse classique de la stabilité de talus par la théorie d'équilibre, conduisait à des conclusions trempées correspondantes à des coefficients de sécurité assez élevés.

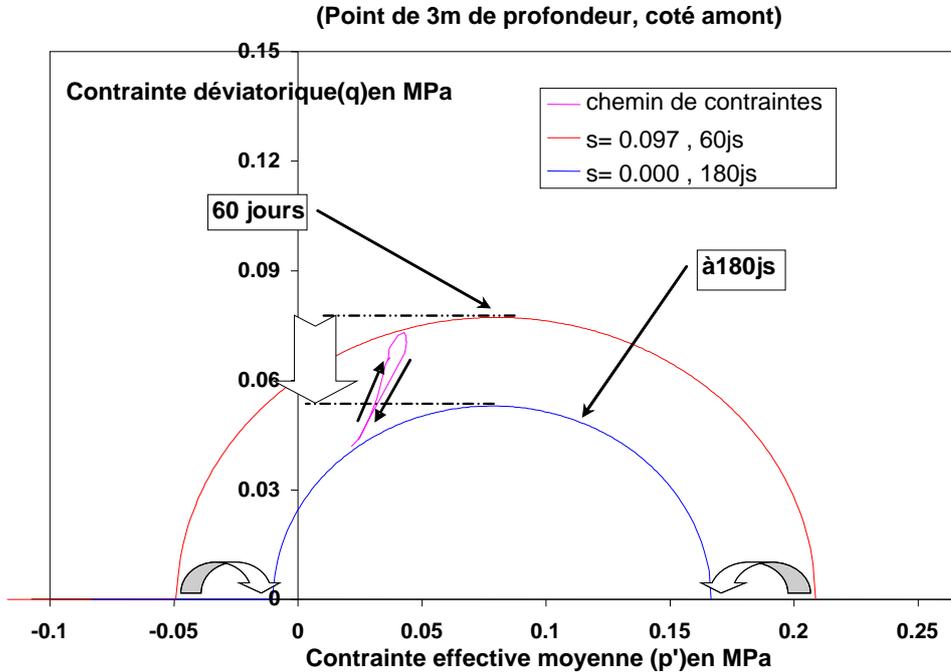


Figure 7. Evolution des surfaces de charge représentées dans le plan (q, p') et chemin de cycle drainage-humidification

En profondeur, la contrainte de préconsolidation est plus importante par rapport à celle de surface, la succion est très faible vue la forte saturation (à l'état saturée les couches sont considérées normalement consolidées). Les résultats obtenus (Figure 8) montrent une légère réduction de la cohésion et de la contrainte de préconsolidation apparente, ce qui diminue le risque de glissement en profondeur et laisse plutôt prédire un glissement de surface. Pour localiser les zones d'effondrement par humidification, on représente pour les chemins de drainage et d'humidification définis précédemment, les surfaces de charge en un point de surface (point au niveau de la couche m1) dans la figure 9. On remarque que la contrainte de préconsolidation apparente a diminué d'une façon significative par rapport à la cohésion. Le glissement dans cette zone est plutôt lié à la chute de la contrainte de préconsolidation qu'à la cohésion.

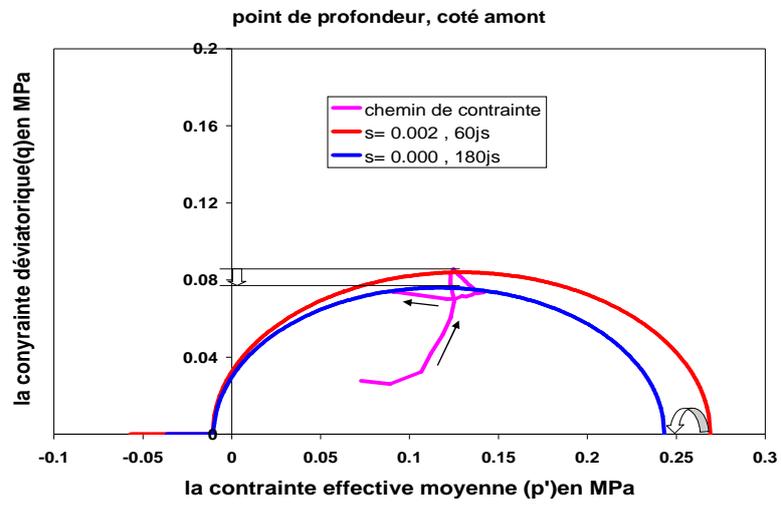


Figure 8. Evolution des surfaces de charge représentées dans le plan (q, p') , chemin de cycle drainage-humidification pour un point en profondeur de 3m.

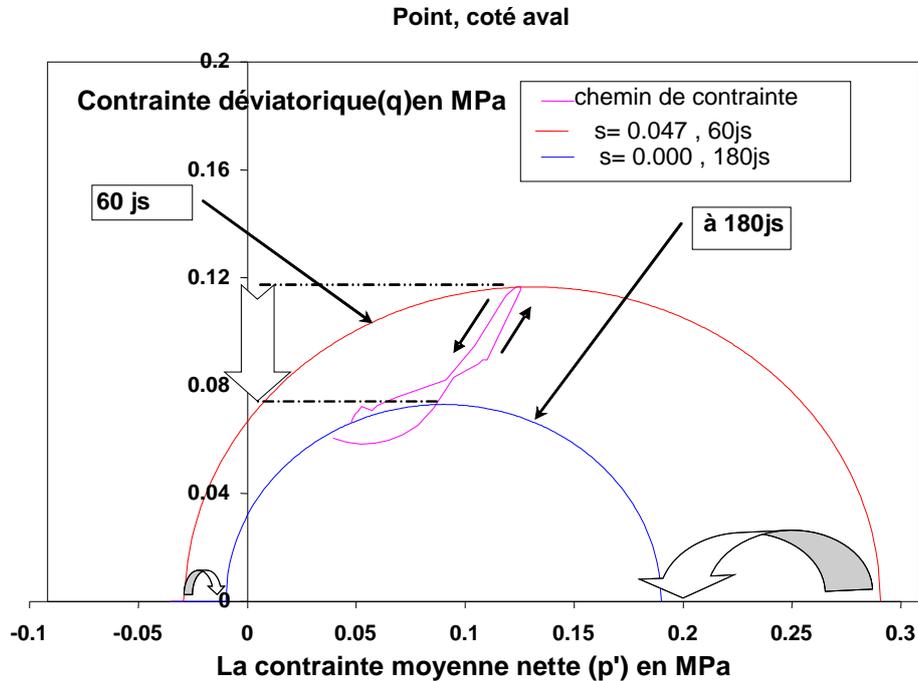


Figure 9. Evolution des surfaces de charge représentées dans le plan (q, p') et chemin de drainage-humidification pour un point dans la couche m1 (côté aval)

4. Conclusion

Dans ce papier on présente les résultats de simulations de stabilité de talus utilisant le modèle BBM qui reste à nos jours peu appliqué pour la prédiction du comportement des ouvrages. Le talus objet de cette étude est constitué de couches de sols à dominance argileuse. Les résultats numériques du modèle utilisant un ensemble de paramètres dont une majorité est déterminée expérimentalement au laboratoire sur les sols en question, montrent la pertinence du modèle en terme de prédiction de l'évolution des caractéristiques mécaniques. Les deux paramètres mécaniques dans le modèle BBM qui sont à retenir et qui sont bien dépendants de la succion sont la cohésion et la contrainte de préconsolidation apparente. L'analyse du mouvement du talus étudié montre que l'effondrement est localisé dans des zones où la saturation est rapide et conduit en premier à la chute de l'un ou de ces deux paramètres mécaniques.

5. Bibliographie

- Alonso E. E., Gens A and Josa A. «*A constitutive model for partially saturated soils* », Géotechnique **40**, N° 3, 1990, p. 405-430.
- DIT-UPC, “CODE_BRIGHT user’s guide”, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Barcelona, (2002).
- Leong EC, Rahradjo H. « *Permeability functions of unsaturated soils* », J. Geotech Eng ASCE, 123 (12), 1997, VCH, p. 1118-1126.
- Marshall TJ. « *A relation between hydraulic conductivity and size distribution of pores* », J. Soil Sc, 9, 1958, p. 1-8.
- NG, C.W.W, Zhan, L.T, Fredlund, D.G. & Gong, B.W., « *Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration* ». Géotechnique **53**, N°. 2, 2003, p.143-157.
- Sahimi, M.. « *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock: From Classical Methods to Modern Approaches* », 1995, VCH, Weinheim.
- Smith, P.G.C.. « *Numerical analysis of infiltration into partially saturated soil slopes.*», A thesis submitted to the University of London, 2003.
- Van Genuchten Mth. « *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils* », Soil Sci Soc Am J., 44, 1980, VCH, p. 892-898.