

Étude de la stabilité des pentes non saturées sous les effets de l'infiltration prenant en compte la végétation

Study of the stability of unsaturated slopes under the effects of infiltration taking into account the vegetation

Hemmati S.

Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

Modaressi A.

Laboratoire MSS-Mat, CNRS UMR 8579, Ecole Centrale Paris, Châtenay Malabry, France

RÉSUMÉ : L'effet de l'extraction d'eau par des racines sur la stabilité des pentes est étudié. Les variations de la teneur en eau et de la succion dans le sol influencées par l'extraction d'eau par des racines ont été calculées par la méthode des éléments finis. La profondeur d'influence de la variation de la succion pour la stabilité est calculée en fonction des paramètres hydro-mécaniques du sol. On peut voir que l'effet de la variation de la succion sur la stabilité des pentes et par conséquent l'effet de l'extraction d'eau par des racines est limité à cette profondeur.

ABSTRACT: In this work the effect of root water uptake on slopes stability is studied. Variations of soil water content and soil suction influenced by root water uptake are calculated using finite elements method. The depth of influence of suction variation on slope stability is calculated as a function of soil hydro-mechanical properties. It can be seen that the effect of variations of soil suction on slope stability is a function of soil properties and therefore root water uptake effect on slope stability is limited to this depth.

Mots-clés : stabilité des pentes, extraction d'eau par des racines, sol non saturé

Key words : slope stability, root water uptake, unsaturated soil

1 INTRODUCTION

L'infiltration d'eau dans un sol non saturé influence la stabilité des pentes. L'infiltration d'eau a deux effets : d'une part, elle augmente le poids du sol humide et d'autre part elle réduit la succion dans le sol, ce qui entraîne une réduction de la résistance au cisaillement du sol. Les variations de degré de saturation et par conséquent la succion dans la profondeur du sol peuvent être déterminées en fonction du taux d'infiltration et des paramètres hydriques du sol.

La végétation a des rôles positifs dans l'amélioration de la stabilité superficielle des pentes. La végétation protège le sol contre l'érosion éolienne, l'impact des gouttes de pluie et l'érosion de la surface à cause de l'écoulement de l'eau de ruissellement. Il réduit le ruissellement et le taux d'infiltration des pluies en raison de l'interception et renforce le sol par des racines (Coppin et Richards, 1990). L'absorption d'eau par les racines des plantes augmente la succion dans le sol et par conséquent la résistance au cisaillement du sol. Ceci a un effet positif sur la stabilité des pentes. L'effet positif de la succion sur la stabilité des pentes dépend des paramètres hydro-mécaniques du sol et il est valable jusqu'à une certaine profondeur. L'intérêt de cette étude est de prédire la profondeur potentielle dans laquelle l'absorption d'eau par des racines pourra être prise en compte comme un facteur positif sur la stabilité des pentes. Dans cette étude, le seul effet de la végétation est de réduire la teneur en eau du sol et d'augmenter la résistance au cisaillement en augmentant la succion du sol. L'extraction d'eau par des racines est ensuite modélisée sur une pente partiellement saturée à l'aide du code de calcul Comsol®. Les profondeurs dans lesquelles l'absorption d'eau par des racines pourra influencer la stabilité des pentes sont étudiées ensuite seulement en fonction des paramètres hydro-mécaniques du sol.

2 CADRE THÉORIQUE

L'infiltration d'eau et l'extraction d'eau par des racines sont présentées très brièvement dans cette partie.

2.1 Infiltration

L'infiltration d'eau dans un sol partiellement saturé peut être décrite par l'équation de Richards :

$$\frac{d(\rho_w \theta)}{dt} = -\nabla(\rho_w K \nabla H) + f \quad (1)$$

où $\theta = S_r n$ est la teneur en eau volumique, K est la conductivité hydraulique (perméabilité) du sol en fonction du degré de saturation et ΔH est le gradient de la charge hydraulique. f est le terme d'extraction qui peut être relié à l'extraction d'eau par des racines. L'équation (1) en fonction de θ et H , peut être également écrite en fonction de la pression d'eau p_w et du degré de saturation S_r :

$$\left(\frac{n S_r}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dp_w} + n \frac{dS_r}{dp_w} \right) \frac{dp_w}{dt} = -\nabla \left(\frac{K}{\rho_w g} \nabla(p_w) + K \right) + f \quad (2)$$

La perméabilité d'un sol non saturé est une fonction de sa perméabilité à l'état saturé et du degré de saturation. L'expression suivante est adoptée dans cette étude :

$$K = k_s \left(\frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}} \right)^3 \quad (3)$$

où k_s est la perméabilité du sol saturé et S_{res} est le degré de saturation résiduelle. On adopte également l'expression de la courbe de rétention d'eau proposé par van Genuchten (1980) :

$$S_r(p_w) = S_{res} + (1 - S_{res}) \left(1 + \left(\frac{\alpha_s p_w}{\rho_w g} \right)^{n_s} \right)^{-m_s} \quad (4)$$

où α_s , m_s et n_s sont des paramètres du matériau.

2.2 Extraction d'eau par des racines

La plupart des modèles d'extraction d'eau sont dérivés du modèle macroscopique de Feddes et al. (1978). Les différences résident en général dans la méthode de détermination des paramètres. Le terme d'extraction f dans l'équation (2) est donné pour chaque profondeur en fonction de l'extraction maximale et une fonction réductrice α .

$$f = \alpha(S_r) f_{\max} \quad (5)$$

Dans le modèle 2D proposé par Indraranta et al. (2006) utilisé par Hemmati (2009) et Hemmati et al. (2011), le terme d'extraction d'eau maximale est défini par :

$$f_{\max}(r, z, t) = G(\beta) F(T_p) \quad (6)$$

où $G(\beta)$ est la fonction de distribution de densité des racines et $F(T_p)$ est la fonction de distribution de transpiration potentielle sur la profondeur z et T_p est la transpiration potentielle.

3 MODÉLISATION DE L'EXTRACTION D'EAU PAR DES RACINES SUR UNE PENTE PARTIELLEMENT SATURÉE

Une pente partiellement saturée avec des racines distribuées sur une profondeur de 1 mètre à partir de la surface du sol est modélisée (Figure 1). L'épaisseur de la couche modélisée est de 10 mètres et la nappe phréatique est considérée sur la base de la pente parallèle à la surface. La pression d'eau sur la surface est donc d'environ -100 kPa avec une distribution initialement linéaire dans la profondeur. La courbe de rétention d'eau est présentée sur la Figure 2 (courbe rouge). Les variations du degré de saturation et de la succion sont présentées sur la Figure 3. Les variations dans le profil de la succion montrent l'effet de l'extraction d'eau par des racines qui pourra se traduire par une augmentation de la résistance au cisaillement du sol. La variation du degré de saturation peut influencer la stabilité des pentes seulement jusqu'à une certaine profondeur, ce qui est étudié dans la section suivante.

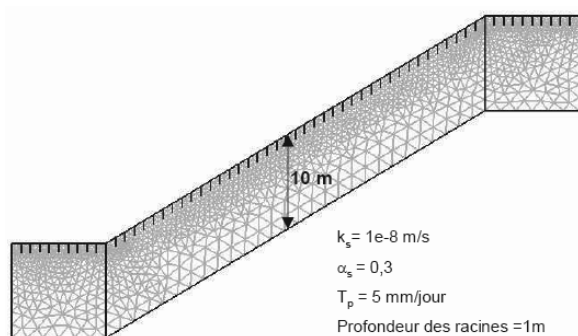


Figure 1 Géométrie de la pente, paramètres hydriques et paramètres de la végétation

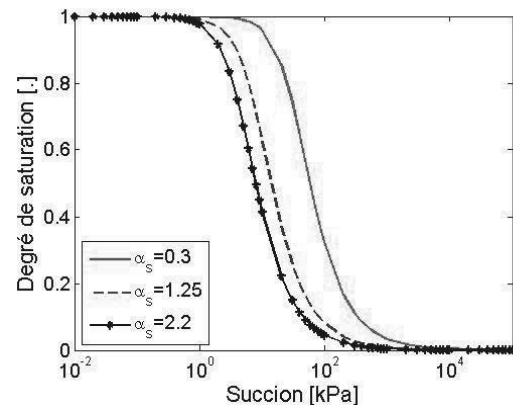


Figure 2 Courbes de rétentions d'eau avec α_s : 0,3, 1,25 et 2,2

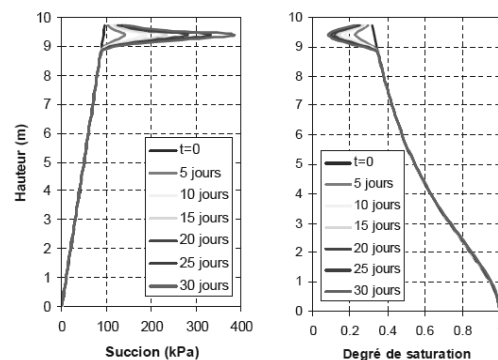


Figure 3 Variations du profil de la succion et du degré de saturation

4 ZONE D'INFLUENCE DE NON-SATURATION

Dans les sols non saturés le facteur de sécurité d'une pente infinie est influencé par la succion dans le sol (Figure 4) :

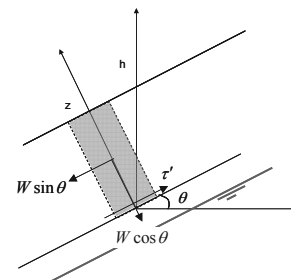


Figure 4 Stabilité d'une pente infinie

$$F = \frac{\tau'}{W \sin \theta} = \frac{(W \cos \theta + f_{ns}(p_a - p_w)) \tan \phi'}{W \sin \theta} \quad (7)$$

où p_a et p_w sont respectivement la pression d'air et la pression d'eau, ϕ' est l'angle de frottement interne du sol. Le paramètre f_{ns} est fonction du degré de saturation du sol. Il peut être également exprimé en fonction du rapport de l'angle de frottement interne à l'état non-saturé et celui à l'état saturé.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de l'infiltration ou de l'évapotranspiration sur la stabilité des pentes dans les sols partiellement saturés. Ainsi on se limite aux cas qui ne sont pas stables dans un état saturé. Le glissement de pente est supposé être dû à l'infiltration de l'eau depuis la surface du sol et la zone de glissement est considérée être dans un niveau supérieur et suffisamment loin de la nappe phréatique. Différentes courbes de rétention d'eau (Figure 2) et

différents angles de frottement interne pour différents angles de talus sont considérés. Les propriétés hydrauliques des sols sont considérées proches de celles des sols argileux. Trois valeurs de l'angle de frottement sont étudiées: 20°, 25° et 30°. Comme on s'intéresse à l'étude de l'instabilité due à la saturation, nous étudions les cas qui ne sont stables que dans l'état non saturé. Par exemple pour un sol ayant un angle de frottement interne de 20°, les angles de talus de 21° (Figure 5), 23° (Figure 6), 25° (Figure 7) et 27° (Figure 8) sont étudiés qui sont tous instables dans le cas saturé. Le coefficient de sécurité diminue par l'augmentation de la teneur eau (réduction de la succion du sol). Pour chaque valeur d'angle de frottement, trois courbes de rétention (Figure 2) sont étudiées en considérant trois valeurs différentes de α_s : 0,3, 1,25 et 2,2. A titre d'exemple, les résultats de calcul sont présentés pour un angle de frottement interne de 20°.

Les figures 5 à 8 représentent les isovaleurs de facteurs de sécurité (F.S.) calculés à différents profondeurs et différents degrés de saturation. Pour un degré de saturation donné, la profondeur donnée par l'isovaleur de F.S.=1 représente l'épaisseur maximale d'une couche stable. Celle-ci peut également se traduire en profondeur d'une zone dans laquelle la stabilité peut être influencée par les variations de degré de saturation. On constate que pour un degré de saturation et un angle de talus donnés, l'épaisseur de la couche stable diminue lorsque le paramètre α_s augmente. A titre d'exemple on considère un talus avec $\theta = 21^\circ$ et $S_r = 0,5$. L'épaisseur de la couche stable pour $\alpha_s = 0,3$ (Figure 5-a) peut atteindre jusqu'à environ 3 mètres, tandis que pour $\alpha_s = 2,2$ (Figure 5-c), elle atteint 0,5 mètre. Les épaisseurs de ces couches stables peuvent se traduire en profondeur d'une zone dans laquelle la stabilité peut être influencée par le degré de saturation.

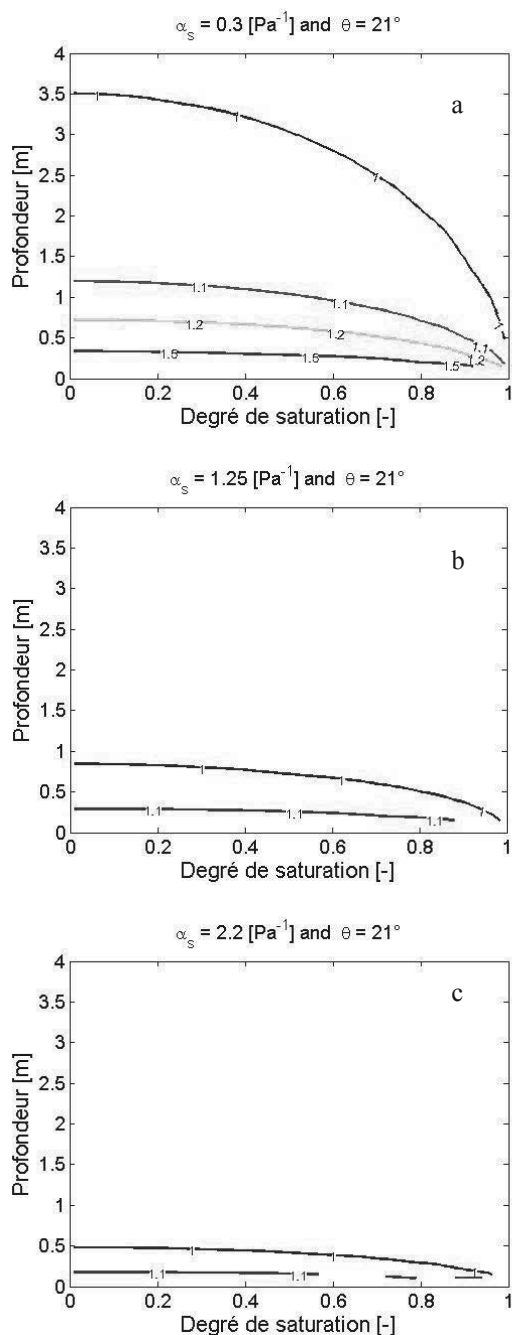


Figure 5. Isovaleurs de facteur de sécurité (angle de talus 21°)

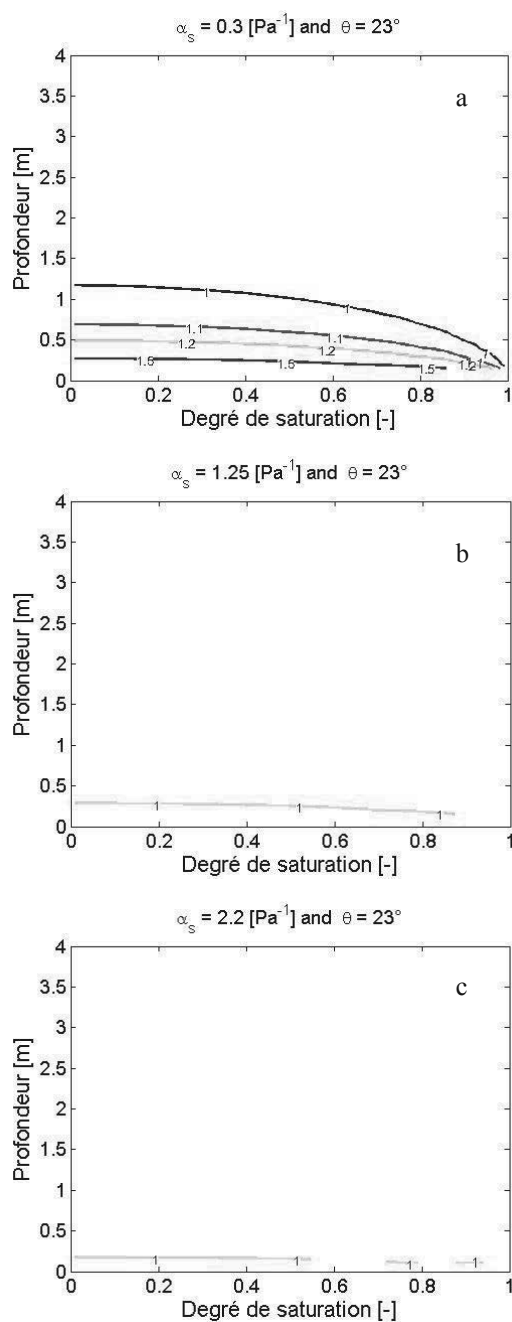


Figure 6 Isovaleurs de facteur de sécurité (angle de talus 23°)

Evidemment pour un angle de frottement interne donné, l'épaisseur de la couche stable diminue avec l'angle de talus, ce qui peut être constaté en comparant les Figure 5-a, Figure 6-a, Figure 7-a et Figure 8.

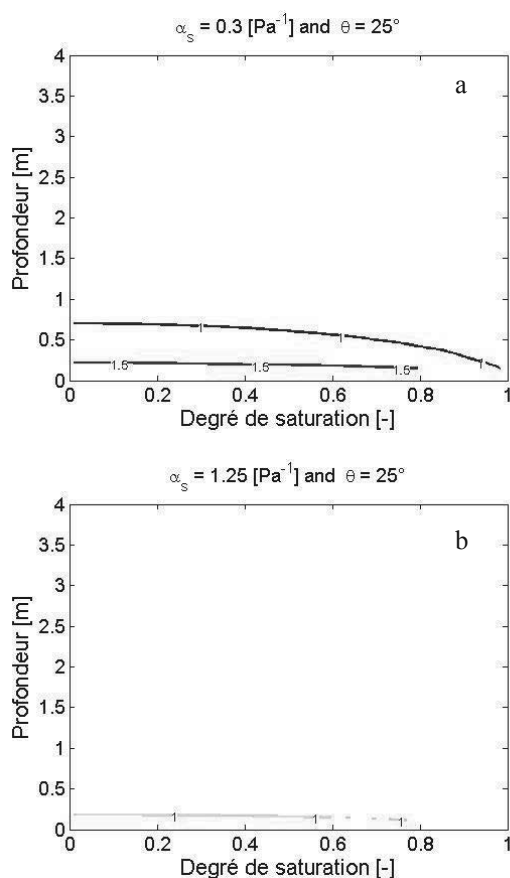


Figure 7 Isovaleurs de facteur de sécurité (angle de talus 25°)

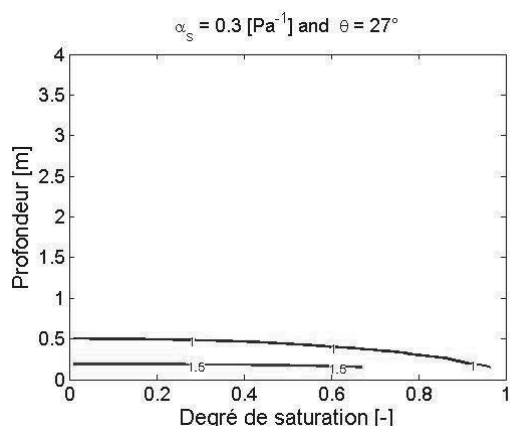


Figure 8. Isovaleurs de facteur de sécurité (angle de talus 27°)

Les résultats montrent que la profondeur d'influence de la non-saturation sur la stabilité des pentes est fonction de la courbe de rétention d'eau du sol. Cette influence est plus significative pour des courbes de rétention correspondant à une valeur de α_s plus petite.

On peut conclure que les paramètres les plus importants pour la stabilité d'un talus à l'état non-saturé sont les paramètres hydriques, i.e. la courbe de rétention d'eau du sol. Ces paramètres contrôlent également l'effet de la succion engendrée par des racines sur la stabilité de talus. Cependant la

contribution mécanique des racines en tant qu'élément de renforcement est indépendante de ces paramètres.

5 CONCLUSION

L'influence de la variation de la succion due à l'extraction d'eau par des racines sur la stabilité des talus est étudiée. Les résultats de la modélisation présentent les variations du profil de saturation et de la succion. Les variations de la succion sont plutôt limitées à la zone racinaire.

Les isovaleurs de facteurs de sécurité pour différentes courbes de rétention d'eau permettent d'évaluer la profondeur d'influence de la non-saturation. Pour un angle de talus donné, en fonction de courbe de rétention d'eau du sol, l'épaisseur d'une couche stable peut être fortement influencée par le degré de saturation dans le cas des α_s faibles. Le degré de saturation joue un rôle moins important sur l'épaisseur de la couche stable pour des valeurs de α_s élevées. La zone d'influence de non saturation peut être donc calculée en fonction des paramètres hydriques du sol, et indépendamment de la cause de variation de la succion. Les résultats montrent que l'importance de la végétation, autrement dit de la non-saturation, sur la stabilité des pentes dépend fortement des paramètres hydriques du sol. Dans la plupart des cas, la zone d'influence de non-saturation est limitée au premier mètre de profondeur. Par conséquent, la présence de la végétation peut renforcer la stabilité d'un talus uniquement pour des glissements superficiels.

6 REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet européen SafeLand (Living with landslide risk in Europe: Assessment effects of global change and risk management strategies). Contract No. 226479.

7 RÉFÉRENCES

Van Genuchten. M.T. A closed form for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Sci. Am. Soc.*, (44):892-898, 1980.

Coppin, N.J. and Richards, I.G. *Use of Vegetation in Civil Engineering*. C.I.R.I.A. Burrelworths: London. 1990.

Indaratna B., Fatahi B., Khabbaz H. "Numerical analysis of matric suction effects of tree roots, *Geotechnical Engineering*, 159 (GE2), 77-90, 2006

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. *Simulation of field water use and crop yield*. Wageningen Center for Agriculture and Documentation, Wageningen, The Netherlands, 1978

Hemmati S., Gatmiri B., Cui Y.J. and Vincent M. Soil-vegetation-atmosphere interaction by a multiphysics approach. *Journal of Multiscale Modelling*, vol. 2, N° 3 et 4, 163-184, 2010

Hemmati S. *Etude de l'Interaction Sol-Végétation-Atmosphère avec une approche couplée Thermo-Hydro-Mécanique*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2009