
Comportement sur chemin de drainage humidification de quelques argiles de Tlemcen (Algérie), partie2 : Modélisation

Feth-Ellah Mounir Derfouf* — **Assia Bendi-Ouis*** — **Nabil Abou-Bekr*** — **Said Taibi**** — **Arézou Modaressi*****

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid
BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, Der_mounir@yahoo.fr, asbendiouis@gmail.com,
aboubekrnabil@yahoo.fr*

** *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE CNRS 1302, Université du
Havre, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France, Said.Taibi@univ-lehavre.fr*

*** *Laboratoire MSS-Mat CNRS UMR 8579, Ecole Centrale Paris
Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France, moda-
ress@mssmat.ecp.fr*

RÉSUMÉ. Les géomatériaux de part leur nature multiphasique, peuvent passer alternativement de l'état saturé à l'état non saturé. Dans l'optique de prendre en compte ce passage d'une manière consistante, une loi constitutive a été développé par Modaressi et Abou-Bekr, 1994, basée sur le concept de contraintes effectives, largement accepté pour les sols saturés, et étendu aux sols non saturés en introduisant la pression capillaire. Cette loi est intégrée dans un modèle élastoplastique plus générale, validée pour les sols saturés ou secs, ensuite généralisé aux sols non saturés en introduisant un écrouissage capillaire. Cet article, présente l'aptitude de ce modèle à prédire le comportement de quelques argiles de Tlemcen sur chemin de drainage humidification.

ABSTRACT. Geostructures due to their multiphase nature may undergo continuously and repeatedly changes from saturated to unsaturated states. In order to take in account these changes in an efficient manner, a constitutive law was developed by Modaressi and Abou-Bekr, 1994, which is based on effective stresses concept, largely accepted in the case of saturated soils, and extended to the case of unsaturated materials by introducing the capillary pressure. This law was integrated in more general elastoplastic model, validated in the case of saturated and dry soils, and generalised to unsaturated case by introducing a capillary hardening rule. The paper presents the ability of the model to predict the behaviour of some clayey soils from Tlemcen, on drying and wetting paths.

MOTS-CLÉS : Contrainte effective, modèle, Argile, drainage, humidification, pression capillaire, écrouissage capillaire.

KEYWORDS: Effective stress, model, Clay, drying, wetting, capillary pressure, capillary hardening.

1. Introduction

Depuis son énoncé, le principe de contraintes effectives de Terzaghi, est devenu la base fondamentale de la mécanique des sols saturés. La contrainte totale σ est ainsi considérée comme la somme de la contrainte effective σ' et de la pression interstitielle u_w .

La possibilité de résoudre les problèmes liés aux sols saturés simplement à l'aide d'une seule variable de contraintes, a motivé de nombreux chercheurs à élargir cette notion aux sols non saturés. Plusieurs formes de contraintes effectives ont été proposées (Bishop, 1959; Aitchison, 1961 ; Jennings, 1961 etc). L'expression de Bishop, 1959, généralise toutes celles données par ces auteurs. Elle s'écrit :

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad [1]$$

Où, $(\sigma - u_a)$ est la contrainte totale nette, $(u_a - u_w)$ est la succion, χ est un paramètre qui définit la contribution de la succion à la contrainte effective, nul pour les sols secs et égal à 1 pour les sols saturés.

La validité de cette expression a toutefois été mise en doute par de nombreux chercheurs ; d'une part du fait que χ est en réalité une fonction forte complexe, et dépende de beaucoup de facteurs : saturation, type de sol, chemin de contrainte appliqué (Jenning et Burland 1962), et d'autre part, parce qu'elle ne peut prendre en compte certains aspects volumiques typiques des sols non saturés, tel que l'effondrement observé l'ors d'un mouillage sous charges importantes.

Pour palier à ces inconvénients, le concept de surface d'état a été proposé (Matyas et Radhakrishna, 1968). Il consiste à représenter le lieu des points de tous les états possibles de l'évolution d'une variable de déformation, ou saturation (indice des vides ou degré de saturation), en fonction de deux variables d'état de contraintes (succion et contrainte totale nette) dans l'espace. L'existence de la surface d'état est cependant liée à des conditions restrictives de variations monotones de la succion. Plusieurs équations de surfaces d'état ont été proposées dans la littérature, par exemple celles de Fredlund, 1979, Lloret et Alonso, 1985, Gatmiri et Delage, 1995. En pratique, les modèles élastiques les plus utilisés sont ceux faisant intervenir le concept de surface d'état, qui permet d'introduire aisément les aspects non linéaires du comportement des sols non saturés (code de calcul UDAM par exemple).

Partant de cette notion, le passage aux variables d'état indépendantes a été effectué assez naturellement par de nombreux chercheurs. Cette évolution fut renforcée à partir de 1977 lorsque Fredlund et Morgenstern, 1977 ont démontré que, parmi les trois variables $(\sigma - u_a)$, $(\sigma - u_w)$ et $(u_a - u_w)$, n'importe quelle paire convient pour décrire le comportement des sols non saturés. Les deux variables les plus utilisées actuellement sont la contrainte totale nette et la succion. Depuis, la notion de variables d'état indépendantes est devenue la notion la plus répandue dans l'étude des sols non saturés, surtout après l'énoncé du modèle d'Alonso *et al*, 1990, qui constitue la première

approche élastoplastique intégrée et tente de reproduire l'ensemble des traits caractéristiques du comportement des sols non saturés.

De même, durant ces dernières années, plusieurs chercheurs ont proposés d'intégrer le principe de contraintes effectives, dans le cadre de l'élastoplasticité. Cette démarche, a donné naissance à des modèles élastoplastiques capables de reproduire la majorité des aspects du comportement des sols non saturés, dont l'effondrement, et permettent notamment d'éviter tous les problèmes de discontinuité qui pourraient résulter de l'utilisation de deux approches fondamentalement différentes dans un même outil de calcul pour modéliser le comportement des sols dans les deux domaines saturé et non saturé. Parmi ces modèles on peut citer celui de Kohgo *et al* ; 1993a et b, Modaressi et Abou-Bekr, 1994, Loret et Khalili, 2000 etc.

2. Contrainte effective dans les sols non saturés

2.1. Cas particulier des sols saturés à pression interstitielle négative

Sur chemin de drainage ou humidification, il existe un seuil en succion, séparant les domaines saturé et non saturé. Ce seuil, est nommé succion de retrait (S_{SL}), et coïncide avec la limite de retrait du matériau, tandis que sur chemin d'humidification, il est nommé succion de resaturation (S_{RES}). Pour des valeurs de succion inférieures à cette limite, l'air se trouve occlus, et ceci correspond généralement à un degré de saturation supérieur à 85%. Biarez *et al*, 1993, Fleureau *et al*, 1993, ont montré que le principe de contrainte effective de Terzaghi reste valide dans ce domaine.

2.2. Définition généralisée de la contrainte effective

Au-delà de la succion (S_{SL} ou S_{RES}), le sol est considéré comme non saturé. L'eau se trouve sous forme de ménisques autour des points de contact entre les grains. Ces ménisques génèrent des forces orthogonales aux plans tangents au niveau des contacts entre grains. L'action globale de ces forces, est définie comme étant une contrainte capillaire, qui ne provoque aucune variation de volume, mais contribue néanmoins à la résistance au cisaillement du matériau qui augmente avec la succion.

L'approche microstructurale proposée par Biarez *et al*, 1993 et Taibi, 1994, a permis de mieux cerner les mécanismes mis en jeu et a fournis une expression de la contribution de la pression capillaire à la contrainte effective, notée $P_{eq}(S)$.

La contrainte effective σ' s'écrit :

$$\sigma' = \sigma - uI \quad [2]$$

Où I est la matrice identité, et :

$$u = S = (u_a - u_w), \text{ si :}$$

$$S \leq S_{SL} \text{ Sur chemin de drainage.}$$

$$S \leq S_{RES} \quad \text{Sur chemin d'humidification.}$$

et, $u = P_{eq}(S)$, si :

$$S \geq S_{SL} \text{ Sur chemin de drainage.}$$

$$S \geq S_{RES} \quad \text{Sur chemin d'humidification.}$$

Où P_{eq} est une fonction de la pression capillaire (S) ainsi que la densité et la granulométrie du matériau. Pour une densité et une granulométrie données, les variations de la contrainte capillaire P_{eq} , en fonction de la pression capillaire doivent :

- Assurer la continuité entre le domaine saturé et non saturé,
- Montrer un palier de valeur maximale pour des valeurs élevées de la pression capillaire.

L'expression de la fonction $P_{eq}(S)$:

$$P_{eq}(S) = P_{eq}^{\max} th\left(\frac{S}{P_{eq}^{\max}}\right) \quad [3]$$

P_{eq}^{\max} Caractérise le palier de la pression capillaire maximale et « th » représente la fonction tangente hyperbolique. Expérimentalement ceci correspond au palier horizontal observé sur un chemin de drainage humidification dans le plan $[e, \log(S)]$, lorsque la pression capillaire dépasse la pression capillaire de retrait S_{SL} .

L'influence de la densité et la granulométrie sur la pression capillaire est prise en compte dans le paramètre P_{eq}^{\max} qui s'écrit sous la forme suivante, déduite du modèle microstructural de Taibi, 1994 :

$$P_{eq}^{\max} = \frac{2\pi\Gamma_s}{K(e).\omega} \quad [4]$$

Où, Γ_s est la tension superficielle à l'interface eau-air ; $K(e)$ est une fonction de l'indice des vides donnée par :

$$K(e) = 0.32e^2 + 4.06e + 0.11 \quad [5]$$

Selon le modèle microstructural de Taibi, 1994, d_{10} est le paramètre représentatif de ω . Il conditionne le palier de la pression capillaire maximale. Des résultats récents sur le sable de Perafita, montrent qu'en présence d'une quantité importante de fines, le paramètre ω peut être inférieur à d_{10} (rapport de 1/20), (Modaressi, 2004).

3. Présentation du modèle élastoplastique pour les sols non saturés (Modèle Modaressi et Abou-Bekr, 1994)

La contrainte effective ainsi définie est utilisée dans le cadre d'une loi de comportement élastoplastique (Hujeux, 1985), largement validée pour les sols saturés et secs.

Le modèle est basé sur la décomposition des phénomènes irréversibles en plusieurs mécanismes élémentaires couplés entre eux, un mécanisme isotrope et trois mécanismes déviatoriques qui permettent de prendre en compte les anisotropies initiales et induites. Chaque mécanisme déviatorique est relié à un plan qui a sa propre variable d'écrouissage correspondant à la distorsion sur ce plan, et son critère de rupture est de type Coulomb avec la fonction de charge de Cam-Clay. Il a été généralisé aux sols non saturés en introduisant un écrouissage en pression capillaire, Modaressi et Abou-Bekr, 1994a et b, Abou-Bekr, 1995. Vu les applications envisagée dans cet article, seule la partie isotrope du modèle sera présentée.

Ce modèle généralisé est essentiellement régi par l'influence de la pression capillaire sur l'indice des vides. Ainsi les variations de la pression capillaire font évoluer la pression de consolidation. Ceci est explicitement pris en compte dans le mécanisme isotrope. En terme de plasticité, ceci est équivalent à une expansion du domaine élastique pris en compte par l'introduction d'une sorte de cohésion isotrope résultant de l'augmentation de la pression de consolidation due aux forces capillaires.

La fonction de charge isotrope est :

$$f_i = |p'| + dP_c^{ns} \quad [6]$$

$$P_c^{ns} = P_c - R(S) \quad [7]$$

$$P_c = P_c^0 \exp(-\beta \varepsilon_v^p) \quad [8]$$

$$P' = P - P_{eq} \quad [9]$$

P' : La pression moyenne effective,

P_c^0 : Pression de consolidation à l'état initial,

P_c : Pression de consolidation dans le domaine saturé,

P_c^{ns} : Pression de consolidation dans le domaine non saturé,

β : Compressibilité plastique, et ε_v^p : est la déformation volumique plastique

$R(S)$: Une fonction de la pression capillaire pour contrôler l'étendue du domaine élastique, où $R(S) = k' \cdot P_{eq}$, où k' est le paramètre qui conditionne l'étendue de ce domaine. Selon Abou-Bekr, 1995, cette fonction nécessite des améliorations, à la vue de nouveaux résultats expérimentaux.

d : Un paramètre mesurant la distance entre la droite d'état critique et la droite de consolidation isotrope normalement consolidée pour un sol saturé (Figure 1).

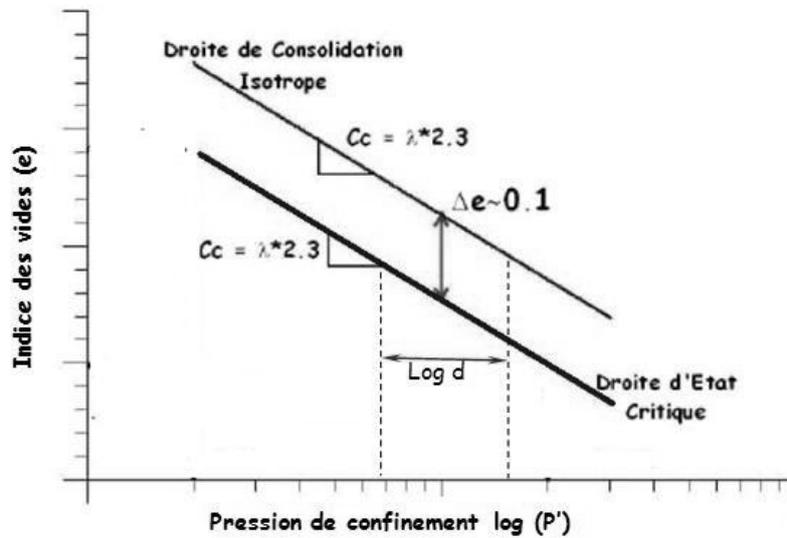


Figure 1. Mécanisme isotrope définition de paramètre d .

Des simulations de plusieurs chemins de contraintes, sur le limon Jossigny ($w_L=37\%$, $I_p=16-19\%$), réalisés par Modaressi et Abou-Bekr, 1994b a montré que le modèle est apte à reproduire tous ces chemins qualitativement et quantitativement, (Figure 2).

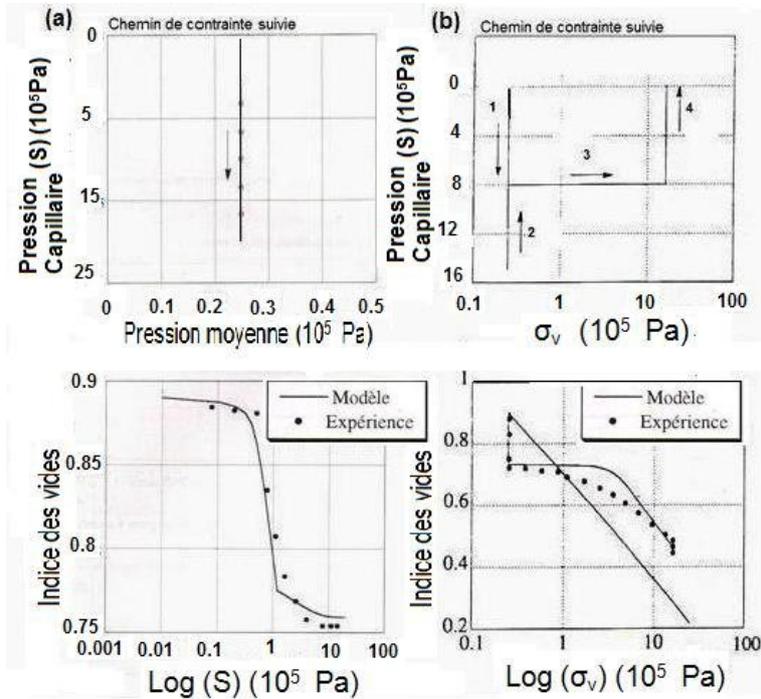


Figure 2. Simulation par modèle Modaressi et Abou-Bekr de : (a) essai de drainage sur le limon de Jossigny initialement sous forme de pâte à $1.5w_L$, (b) essai d'effondrement sur le limon de Jossigny, Modaressi et Abou-Bekr, 1994b.

4. Simulation des chemins de Drainage et humidification de quelques argiles de Tlemcen

La figure 3 présente les résultats de simulation des chemins de drainage humidification, sous contrainte extérieure nulle pour la Bentonite industrielle de Maghnia, l'argile du gisement de Bentonite de Maghnia, l'argile de Sikkak et la marne de Bouhennak, initialement sous forme de pâte à $1.5w_L$. L'ensemble des paramètres du modèle, sont déterminés à partir des essais oedométriques ainsi que des essais de drainage humidification. L'angle de frottement interne ϕ a été déduit des corrélations de Biarez et Favre, 1975, reliant ce paramètre à la limite de liquidité. Plus de détails sur les paramètres du modèle peuvent être trouvés dans GEFDYN, 1989. Le tableau 1, regroupe le jeu de paramètres considérés dans cette simulation.

En analysant l'évolution de l'indice des vides en fonction de la pression capillaire pour les quatre matériaux étudiés, on peut formuler les constatations suivantes :

- Les chemins de drainage humidification simulés par le modèle montrent une bonne concordance avec ceux déterminés expérimentalement.
- Il n’y a pas de problème de discontinuité entre les domaines saturé et non saturé.
- Les déformations irréversibles dans le domaine saturé à pression négative sont bien reproduites.
- Au-delà de la pression capillaire de retrait S_{SL} , on obtient bien un palier horizontal où les déformations sont réversibles, donc un domaine où le comportement est élastique.

Sur chemins d’humidification, le gonflement remarqué sur les quatre matériaux, notamment pour la Bentonite industrielle et l’argile du gisement de Bentonite, ne sont pas bien simulés par le modèle. Le modèle n’est donc pas bien adapté aux sols particulièrement gonflants.

Matériaux Paramètres	Argile de Sikkak	Marne de Bouhennak	Argile du gisement de la Bentonite de Maghnia	Bentonite industrielle de Maghnia
K_{ref} (MPa)	160	160	117	150
G_{ref} (MPa)	120	120	88	80
β	17.2	20	12.2	12
n(porosité)	0.56	0.55	0.74	0.77
d	1.6	1.85	1.2	1.2
ϕ (°)	26	24	21	20
S_{SL} (kPa)	3500	5000	5500	7000
k'	0.7	1.1	0.9	0.9

Tableau 1. Les paramètres du modèle pour les matériaux étudiés

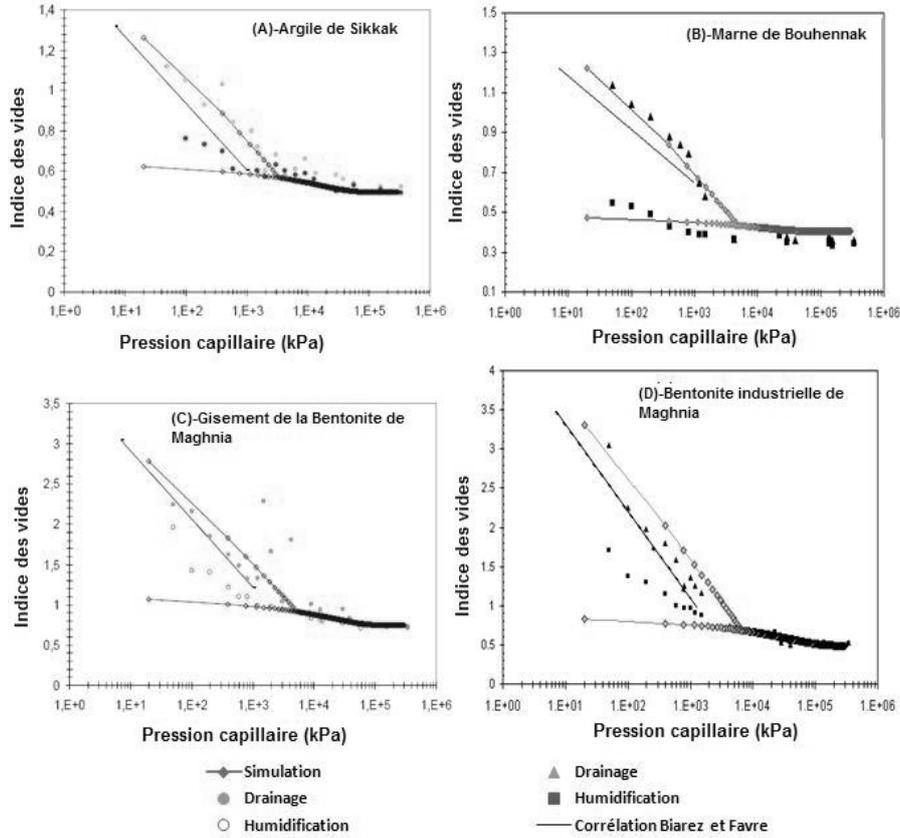


Figure 3. Simulation de l'évolution de l'indice des vides pendant l'essai de drainage humidification sur les matériaux étudiés, initialement sous forme de pâte à $1.5w_L$.

5. Conclusion

Les comparaisons entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux montrent que le modèle est en mesure de reproduire quantitativement de façon acceptable les chemins de drainage humidification sous contraintes extérieures nulles, des différents types de matériaux étudiés.

Ces résultats quantitatifs, et d'autres, comme ceux de Modaressi et Abou-bekr, 1994a et b, et Abou-Bekr, 1995, ont montré l'intérêt de conserver le concept de contrainte effective pour les matériaux non saturés dans la mesure où, d'une part la

quasi-totalité des paramètres est déterminé à l'aide d'essais expérimentaux saturés et d'autre part le passage entre les domaines saturé et non saturé s'effectue sans difficultés particulières.

6. Bibliographie

- Aboubekr. N., Modélisation du comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturés. Thèse de doctorat. École centrale de Paris, 1995.
- Alonso.E.E., Gens.A. Josa.A., « A constitutive model for partially saturated soils», *Geotechnique*, vol. 40, 1990, pp. 405-430.
- Aitchinson, G.D., « Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils», *Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworth, Londres, 1961, pp. 47-52.
- Bendi-ouis, A., Comportement des argiles des barrages Sikkak et Boughrara soumises à une pression interstitielle négative. Mémoire de Magistère de l'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005
- Biarez, J., Favre, J.L., « Table ronde sur les corrélations des paramètres en mécanique des sols», Ecole Centrale Paris, 1975.
- Biarez.J., Fleureau.J.M., Taibi.S., « Constitutive model for unsaturated granular media», *Proceedings 2nd Int. Conf. Micromechanics of Granular Media*, Birmingham, Balkema eds., 1993, pp. 51-58.
- Bishop, A.W., « *Teknisk Ukeblad*, n° 39, 1959, pp. 859-863.
- Derfouf, F.E.M., Comportement de deux argiles de la région de Tlemcen sur chemin de drainage humidification, étude expérimentale et modélisation. Mémoire de Magistère de l'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- Fleureau.J.M., Contribution à l'étude et à la modélisation du Comportement des matériaux granulaires polyphasiques. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, 1992.
- Fleureau.J.M., Kheirbek-Saoud.S., Soemitro.R, Taibi.S. « Behavior of clayey soils on drying-wetting paths», *Canadian Geotechnical journal*. Vol. 30, 1993, pp 287-296.
- Fredlund. D.G. « Appropriate concepts and technology for unsaturated soils», *Canadian Geotechnical Journal*., vol. 16, 1979, pp. 121-139.
- Fredlund. D.G, Morgenstern N.R « Stress state variables for unsaturated soils», *ASCE J. Soil Mech. and Found. Eng.*, GT 5, 1977, pp. 447-466.
- Gatmiri B. Delage P. « Nouvelle formulation de la surface d'état en indices des vides pour un modèle non linéaire élastique des sols non saturés», *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, vol. 2, Paris, Balkema/Presses des Ponts et Chaussées, 1995, pp. 1049-1056.
- GEFDYN. « Manuel scientifique », 1984.
- Hujeux.J.C., « Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols», *Genie parasismique*, édition Dadividicci , 1985, pp 287-302.

- Kohgo.Y., Nakano.M..T. « Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils», *Soils and Foundations*, vol. 33, n° 4, 1993a, pp. 49-63.
- Jennings.J.E.B., « A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils», *Pore Pressure and Suction in Soils*. Butterwoths : Londres, 1961, pp. 26-30.
- Jennings.J.E.B. Burland. J.B « Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils», *Géotechnique*, vol 12, 1962, pp. 125-144.
- Kohgo.Y., Nakano.M..T. 1993a., « Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils», *Soils and Foundations* 33, n° 4, 1993a, pp. 49-63.
- Kohgo.Y., Nakano.M. Miyazaki .T., « Verification of the generalised elastoplastic model for unsaturated soils», *Soils and Foundations* 33, n° 4, 1993b, pp. 64-73.
- Lloret A. Alonso E.E. « State surface for partially saturated soils», *Proc. of the 11th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng*, San Francisco, vol. 2, 1985, pp. 557-562.
- Loret.B., Khalili.N., « A three-phase model for unsaturated soils», *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* vol 24, 2000, pp.893–927.
- Matyas. E.L. Radhakrishna. H.S., « Volume change characteristics of partially saturated soils», *Geotechnique*, vol. 18, n° 4, 1968, pp. 432-448.
- Modaressi A. Aboubekr. N., « A unified approach to model the behavior of saturated and unsaturated soils», *Conferance on computer methods and advances in geomechanics*. H.J.Siriwardane and M.M. Zaman (ed.), Balkema, 1994a, pp. 1507-1513.
- Modaressi A. Aboubekr. N., « Constitutive model for unsaturated soils ; validation on silty material», *Third European Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Manchester, Balkema eds, 1994b, pp. 91-96.
- Modaressi. A., « Cours Mécanique et hydraulique avancée des sols», Ecole centrale de Paris, 2004.
- Taibi, S., *Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative, étude expérimentale et modélisation*. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Paris, 1994

8. Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet PAI CMEP TASSILI (réf. 06/MDU/690) entre l'Université A. Belkaid, Tlemcen et l'Université du Havre.