
Comportement volumique à succion contrôlée de l'argile du barrage de Boughrara (Tlemcen)

Feth-Ellah Mounir Derfouf* — Said Taibi** — Nabil Abou-Bekr*
— Mohammed Amine Allal* — Huaqing Wang**

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, Der_mounir@yahoo.fr, aboubekrnabil@yahoo.fr, aminallal@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, huaqing.wang@univ-lehavre.fr*

RÉSUMÉ. Dans cet article, on présente un nouvel appareil oedométrique à succion contrôlée, utilisant la technique osmotique. Les premiers résultats obtenus sur chemin de chargement déchargement à succion contrôlée, sur l'argile du noyau du barrage de Boughrara consolidée à 100kPa, sont représentés en termes de contraintes totales et effectives. Ces résultats montrent que la succion rigidifie le matériau; et une interprétation en contrainte effective montre que ces courbes se regroupent d'une façon satisfaisante autour de la droite NC saturée, justifiant une interprétation des résultats en contrainte effective de Terzaghi tant que le matériau est saturé ou proche de la saturation.

ABSTRACT. In this paper, a new osmotic oedometer, recently developed is presented. The first results obtained on loading-unloading stress path, with constant suction, are plotted in term of total and effective stresses. These results show that suction contribute to the stiffness of soil; while with effective stress, it seems that curves are gathered satisfactorily around saturated NC line, justifying an interpretation of results with Terzaghi effective stress while the soil is saturated or not far from the saturated state.

MOTS-CLÉS: succion, oedomètre osmotique, contrainte effective, contrainte totale

KEYWORDS: suction, osmotic oedometer, effective stress, total stress

1. Introduction

Depuis les années soixante du siècle dernier, de nombreux travaux ont été menés, afin de comprendre le comportement hydromécanique des sols non saturés. Ce nombre relativement important de recherches n'a eu lieu qu'après le développement d'appareils mettant en œuvre les différentes techniques d'imposition de succion, tels que le triaxial, l'oedomètre, et l'appareil de cisaillement direct. L'oedomètre est l'un des appareils adapté assez tôt pour imposer la succion (Escario, 1969, et Barden *et al*, 1969). Ainsi les premiers résultats obtenus avec de tels dispositifs, ont constitué les bases théoriques du développement de modèles propres aux sols non saturés, tels que : les modèles basés sur le concept de contrainte effective dans sa version première, énoncé par Bishop, 1959, ensuite développés par plusieurs chercheurs (Biarez *et al*, 1993, Modaressi et Abou-Bekr, 1994, Kohgo *et al* ; 1993a et b, Loret et Khalili, 2000, etc), les modèles basés sur le concept de surface d'état (Matyas et Radhakrishna, 1968, Lloret et Alonso, 1985, etc), et les modèles basés sur le concept de variables d'états indépendantes, représentés par le modèle d'Alonso *et al*, 1990.

A l'université de Tlemcen, et en collaboration avec l'université du Havre, un nouvel oedomètre à succion contrôlée a été développé. Cet appareil permet d'étudier le comportement des sols non saturés, suivant différents chemins de sollicitations hydriques et mécaniques, en utilisant la technique osmotique pour imposer la succion. Les premiers résultats de caractérisation de l'argile du noyau de barrage de Boughrara, consolidé à 100kPa, suivant un chemin de chargement déchargement à succion contrôlée, sont présentés. Ces résultats, sont ensuite interprétés en termes de contraintes totales et de contrainte effective de Terzaghi.

2. Technique Osmotique

La méthode osmotique est une technique simple à mettre en œuvre pour imposer des succions comprises entre 0.5 et 10 MPa. Son principe consiste à mettre l'échantillon de sol en contact avec une solution de macromolécules organiques de polyéthylène glycol PEG, par l'intermédiaire d'une membrane semi-permeable ne laissant passer que l'eau. Cette solution se trouve à une pression osmotique fixée par la concentration en PEG et à l'équilibre la pression interstitielle de l'eau dans l'échantillon correspondra à cette pression osmotique. La courbe d'étalonnage de PEG en fonction de la succion imposée, a été établie par plusieurs auteurs. La figure1 représente celle obtenue par Williams et Shaykewich 1969, complétée par Delage *et al*, 1998. Cette relation est indépendante du type de PEG et elle peut être approchée par une équation parabolique, de forme : $s=11c^2$ où, s : est la succion (MPa) ; c : est la concentration de PEG exprimée en g de PEG par g d'eau.

Pour la préparation de nos solutions, nous avons utilisé la courbe d'étalonnage représentée sur la figure1, en choisissant le PEG 6000 avec une membrane en

triacétate de cellulose de référence commerciale Spectra/Por® n°3 avec un MWCO (Molecular Weight Cut-Off) de 3500 Da.

Ces membranes semi-perméables utilisées peuvent être dégradées par les bactéries naturellement présentes dans le sol. L'ajout de quelques gouttes de pénicilline, ou d'acide benzoïque dans chaque solution élaborée, peut limiter leur action et prolonger la durée de vie de la membrane. Il est nécessaire aussi d'attendre 2 jours entre la préparation et l'utilisation d'une solution; ce délai permet en effet la stabilisation de la densité de la solution (Cui, 1993).

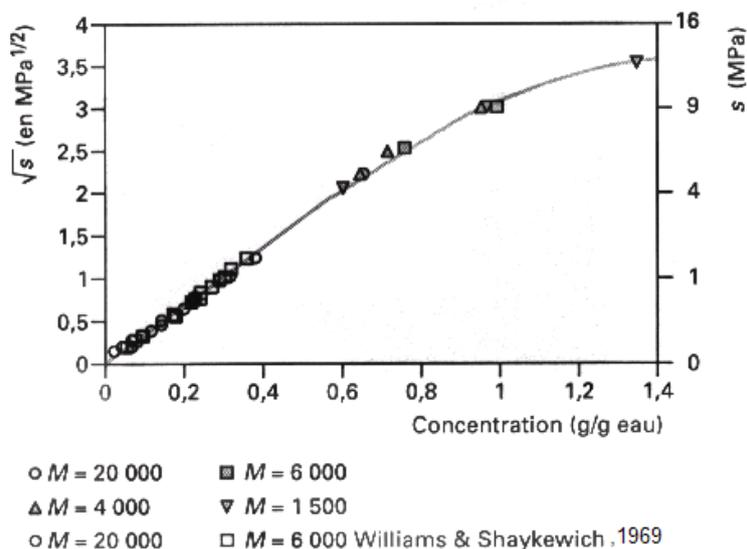


Figure 1. Courbe d'étalonnage du PEG, Delage et al, 1998.

3. Oedomètre osmotique

Un oedomètre à succion contrôlée à été développé, mettant en œuvre la technique osmotique. Cet appareil a été conçu de façon à permettre :

- Une imposition de la succion par la base et la tête de l'échantillon, ce qui réduit la hauteur de drainage, et homogénéise la succion sur la hauteur de l'échantillon.
- D'appliquer des charges élevées sans avoir de problèmes de circulation du PEG notamment quand la concentration de ce dernier devient élevée.

Une coupe transversale de l'oedomètre est représentée sur la figure 2, ainsi qu'une vue de l'ensemble du dispositif expérimental en cours d'essai est illustrée sur la photo 1.

3.1. Description de la cellule (Figure 2)

3.1.1. Embase de la cellule

L'embase de la cellule (1) est modifiée de façon à permettre l'imposition de la succion par la base de l'échantillon, et ceci en usinant un réservoir (6) de 70mm de diamètre et de 10mm de hauteur, surélevé par une plaque perforée (3); suffisamment rigide pour supporter les contraintes appliquées à l'échantillon de sol. Cette plaque repose sur un joint torique (4) logé sur le périmètre du réservoir, afin d'assurer son étanchéité. Ce dernier est relié, d'un côté, au piston par le biais d'un tube flexible et un robinet (8), et de l'autre, par un deuxième robinet (8) raccordé au réservoir de la solution de PEG par un autre tube flexible.

3.1.2. Bague de la cellule

Un joint torique (7) fixé sur le périmètre, assure l'étanchéité entre la membrane semi-perméable (5) posée sur la plaque perforée (3) et l'échantillon de sol. L'ensemble de ces modifications assurent une étanchéité parfaite après le serrage vertical de la bague par les boulons de fixation (9).

3.1.3. Piston à double fonction

Usuellement, le piston (10) assure la transmission de la charge appliquée à la surface supérieure du sol. Dans cette cellule, il assure une double fonction. D'une part, la transmission de la charge et d'autre part, l'imposition de la succion sur la face supérieure de l'échantillon.

De la même façon, un réservoir (11) de 47mm de diamètre et de 7mm de hauteur est usiné, et sur lequel repose une plaque perforée rigide (13) de 63mm de diamètre. Une différence par rapport au système de l'embase, est que l'étanchéité est assurée par un joint torique (15) logé sur un écrou (14) qui se fixe avec le piston. Le serrage de ce dernier provoque l'emboîtement du joint torique avec la membrane semi-perméable (12) placée sur la plaque perforée.

L'adjonction d'un circuit fermé activé par une pompe péristaltique contenant la solution, entre la cellule osmotique et un réservoir de volume suffisamment important permet de maintenir une concentration constante malgré les échanges avec le sol.

3.2. Mesure des échanges hydriques

Les variations de la teneur en eau de l'échantillon durant un essai correspondent aux échanges entre l'échantillon et la solution de PEG circulant dans un circuit fermé. Ces échanges peuvent être estimés soit par mesure des variations du volume ou de la masse du flacon de la solution.

Dans ce travail, comme dans celui de Delage *et al*, 1992, les variations des échanges hydriques se font par mesure du volume du réservoir. Cette méthode

consiste à relier un tube capillaire gradué au réservoir de la solution osmotique, et de suivre son niveau.

Cette mesure peut cependant être perturbée par l'évaporation qui peut avoir lieu au niveau des différentes parties du système de circulation. Pour limiter l'évaporation, les cellules oedométriques ont été entourées de papier cellophane, et des morceaux de coton saturés de solution osmotique sont posés pour enfermer l'espace annulaire entre le piston et la bague, ce qui permet de maintenir une humidité relative importante au niveau de l'éprouvette. Aussi, le réservoir sera placé dans un bain thermostaté afin que les mesures ne soient pas affectées par la dilatation thermique de la solution. Toutefois, cette technique n'a pas marché, et ceci à cause des fluctuations permanentes de la solution dans le tube capillaire, dues aux pulsations de la pompe péristaltique. Pour cela les résultats des échanges hydriques ne seront pas présentés dans cet article. L'état d'équilibre est considéré comme atteint, lorsque les déformations se stabilisent. Cette durée varie entre 1 et 5 jours, et ceci en fonction de la succion imposée, et de la charge appliquée.

3.3. Mesure des déplacements verticaux

Les déplacements verticaux sont mesurés à l'aide d'un capteur de déplacement de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer) relié à un afficheur. Le capteur de déplacements utilisé permet d'avoir une précision de l'ordre de 0,01mm. Les déformations verticales ont été corrigées en prenant en compte les déformations du système "bâti-cellule-capteur" qui ont été évaluées en utilisant une cale en acier pouvant être considérée comme indéformable.

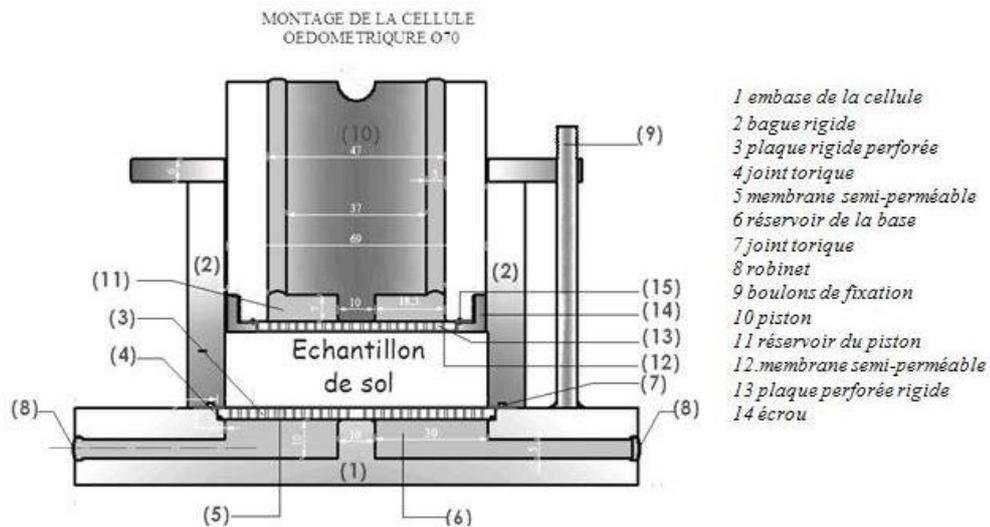


Figure 2. Coupe transversale de l'oedomètre osmotique à double échange

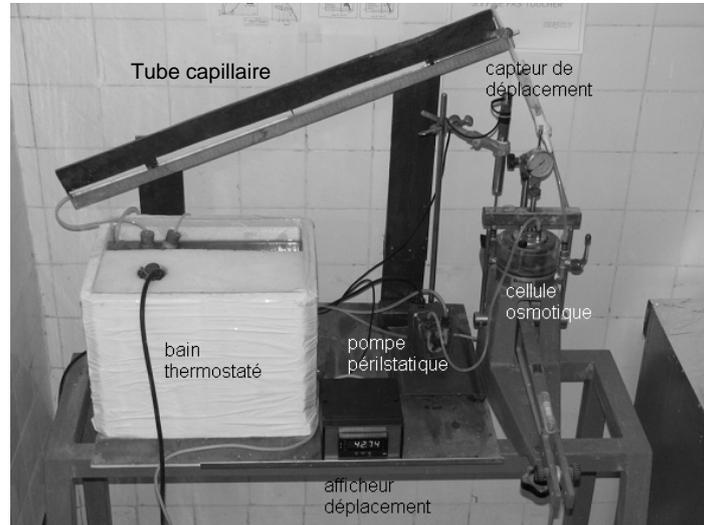


Photo 1. Vue d'ensemble d'un essai oedométrique utilisant la cellule osmotique à double échange.

4. Identification du matériau

Le matériau sujet de cette étude est le matériau du noyau du barrage de Bouhrara; situé à 60km au Nord-Ouest de la ville de Tlemcen. Selon la classification USCS/LCPC, ce matériau est une argile faiblement organique très plastique (fO-At). De la valeur de la teneur en carbonate de calcium et du coefficient d'activité, on déduit que c'est une argile non active et peu calcaire. Les tableaux 1 et 2 regroupent les différents paramètres physiques et chimiques du matériau.

Granulométrie				Plasticité			Densité des grains solides
<80 μm	<2 μm (2)	D60	D10	w _L	w _P	Ip(1)	γ_s/γ_w
%	%	μm	μm	%	%	%	
NF P94-056 et 057				NF P94-051			NF P94-054
90	52	8.25	<1	54	26	28	2.65

Tableau 1. Paramètres physiques de l'argile de Bouhrara

Teneur en CaCO ₃	Valeur de bleu	Surface Spécifique	Teneur en MO	Ac
%		m ² /g	%	(1/2)
	NF P94-068	NF P94-068	NF P94-047	
20	4.68	97.95	7	0.54

Tableau 2. Paramètres chimiques de l'argile de Bouhrara.

5. Déroulement des essais

L'argile de Boughrara a été initialement préparée sous forme de pâte saturée, ensuite consolidée à une contrainte de 100kPa sous une pression interstitielle nulle, avant d'être drainée à une succion de 200kPa, 600kPa et 2000kPa (essais E1, E2, E3). Une phase de chargement-déchargement est entamée en maintenant la succion constante. La série a été complétée par deux essais saturés classiques : un sur une pâte consolidée à 100kPa (E4), et l'autre sur une pâte préparée à $1.5w_L$ (E5). L'ensemble des chemins suivis sont résumés dans le tableau 3 et la figure 3.

Dans un premier temps nous avons choisi de consolider nos échantillons directement dans l'oedomètre osmotique (essai E1, tronçon A-B, Figure 3). Ceci permet d'entamer la phase de mise en succion sans déchargement de l'éprouvette puisque l'état initial (e_0) est connu, cependant cet état sera différent pour chaque échantillon préparé. Cette procédure a été remplacée par consolidation d'une quantité suffisante de matériau dans un consolidomètre. La pâte consolidée obtenue est conservée dans un sac étanche, ensuite placée dans un endroit hermétiquement isolé, pour être utilisée pour les essais qui restent (E2, E3, E4).

A chaque essai, l'échantillon est extrudé avec la bague de l'oedomètre à partir de la pâte consolidée. Ses caractéristiques initiales : teneur en eau, indice des vides, degrés de saturation, sont déterminées par pesée des chutes au Kerdane, (Zerhouni, 1991). Pour les essais E2 et E3, une phase de rechargement en conditions saturées à 100 kPa est suivie, avant l'application de la succion, afin de retrouver l'état de contrainte initiale (tronçon A-B dans la figure 3).

Donc, au point B de la figure 3, tous les échantillons se trouvent dans un état normalement consolidé. La contrainte de consolidation à saturation, déterminée graphiquement à partir de la courbe oedométrique E4, vaut $\sigma'_{v0} \approx 110\text{kPa}$.

6. Mode de chargement mécanique

Le mode de chargement mécanique qui a été retenu dans les essais utilisant l'oedomètre osmotique est le chargement par paliers successifs. Cependant, ce mode de chargement peut perturber l'interprétation des essais hydromécaniques, du fait que les différents paramètres mécaniques qui peuvent être obtenus à partir des courbes de compressibilité dépendent du mode de chargement adopté. Cui et Delage 1996, ont comparé les résultats d'essais à succion contrôlée avec chargement par paliers chaque 48h avec ceux obtenus par un chargement quasi-continu à une vitesse $=0.6\mu\text{m}/\text{min}$. Dans le cas du chargement par étapes, la pression de consolidation apparente est sous-estimée de même que les pentes de compressibilité (calculées en contrainte totale). Ainsi, Guiras-Skandaji, 1996 a montré que selon que les incréments de charge étaient effectués toutes les 24 h ou bien après avoir atteint l'équilibre des déformations, les paramètres étaient significativement différents.

Afin de limiter l'influence du mode de chargement retenu, il a été décidé d'attendre la stabilisation des déformations de l'éprouvette avant d'appliquer l'incrément de charge suivant.

Essai	Chemin suivi	Succion (kPa)	Contrainte max Atteinte (kPa)	État initial
E1	A-B-C-D-C	200	2000	Pâte saturée Consolidée à 100kPa
E2	A-B-E-F-G	600	1600	
E3	A-B-H-I-J	2000	2500	
E4	A-K-A	0	2300	Pâte à 1.5w _L
E5	A-K-A	0	2400	

Tableau3. Chemins de contraintes suivis.

Essai	Succion (kPa)	$\Delta H/H_0$ (%)	$\sigma_{v0}(s)$ (kPa)	$\lambda(s)$	$\kappa(s)$
E1	200	7.45	220	0.138	0.029
E2	600	8.8	220	0.104	0.027
E3	2000	11.44	280	0.100	0.016
E4	0	/	110	0.139	0.047
E5	0	/	/	0.152	0.045

Tableau4. Paramètres mécaniques obtenus dans le plan des contraintes totales

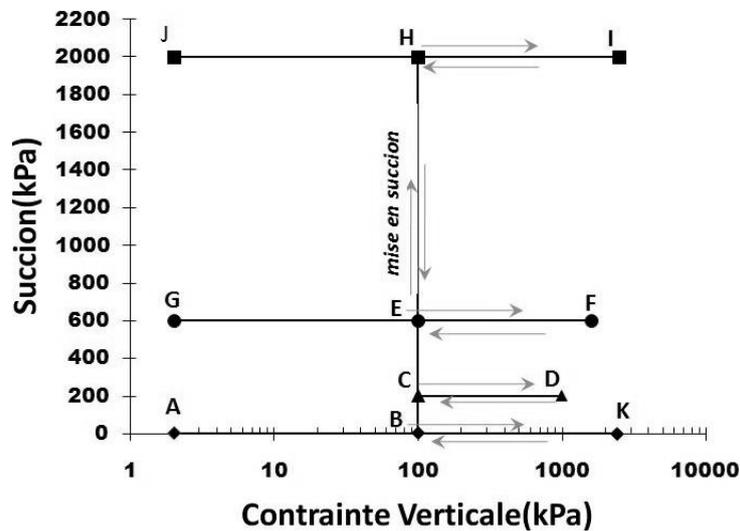


Figure3. Illustration du chemin de contraintes suivi.

7. Représentation des résultats

Les résultats sont présentés sur la figure 4, où l'indice des vides est représenté en fonction de la contrainte totale (σ_v). L'indice des vides initial de la série E1, est supérieur à celui des séries E2, E3, et E4, puisque cet échantillon est consolidé directement dans l'oedomètre. Cet indice des vides correspond à celui d'une pâte à w_L , alors que pour les autres essais ; il correspond à une pâte déjà consolidée à 100kPa dans le consolidomètre.

La première constatation, est que la variation de l'indice des vides par drainage sous l'effet de la succion imposée, à une contrainte de 100kPa, est d'autant plus important que la succion imposée est grande. Le calcul du rapport $\Delta H/H_0$, (H_0 est la hauteur de l'échantillon après consolidation, (correspondant au point B dans la figure3), nous donne une déformation de 7.45% pour une succion de 200kPa, 8.8% pour une succion de 600kPa, et de 11.44% pour une succion de 2000kPa, (Tableau 4).

Le chargement qui s'en suit met en évidence un écrouissage d'origine hydrique. Le matériau suit un chemin caractérisé par de faibles déformations « surconsolidé », suivi d'un autre où les déformations deviennent importantes « normalement consolidé ».

Par analogie aux sols saturés, l'intersection des droites de prolongement de la pente des deux chemins permet de définir une pression qu'on nomme pression de consolidation apparente ($\sigma_{v0}(s)$). Cette valeur est d'autant plus importante que la succion augmente, ce qui signifie que le drainage rigidifie le sol. Cependant, il apparait sur la figure 4, que la valeur de $\sigma_{v0}(s)$ des essais E1 et E2 sont identiques.

L'examen de la pente des droites de chargement $\lambda(s)$, et de déchargement $\kappa(s)$, calculées dans le plan des contraintes totales (Tableau 4 et Figure 4), permet de dire, qu'à l'exception de la courbe E2 pour $\lambda(s)$, ces deux paramètres diminuent avec l'augmentation de la succion. Ce qui rejoint la majorité des résultats obtenus dans la littérature. Le cas particulier de E2, est peut être dû au fait que le chargement s'est arrêté à 1600kPa. En ce qui concerne $\kappa(s)$, nos observations son contraire a ce que postulent Alonso *et al*, 1990, qui considèrent que $\kappa(s)$, est indépendante de la succion. On observe une diminution de $\kappa(s)$ avec l'augmentation de la succion (Tableau 4), ce qui rejoint les constatations de Rampino *et al*, 2000 et Cuisinier, 2000.

Le tracé de ces résultats en contrainte effective (σ_v+s), conduit à un décalage des courbes vers la droite (Figure 5). Ainsi, les courbes de chargement des essais E1 et E2 se trouvent regroupées d'une façon satisfaisante autour de la droite NC saturée (essai E5), et justifie une interprétation en contrainte effective de Terzaghi des essais saturés à pression interstitielle négative. Cependant, la courbe de chargement de l'essai E3 (S=2000kPa), croise la droite NC saturée, pour la rejoindre après une valeur de contrainte effective de l'ordre de 2800kPa (Figure 5), ce qui rejoint les constatations de Taibi, 1994, sur l'argile P300, et le limon de Sterrebeek.

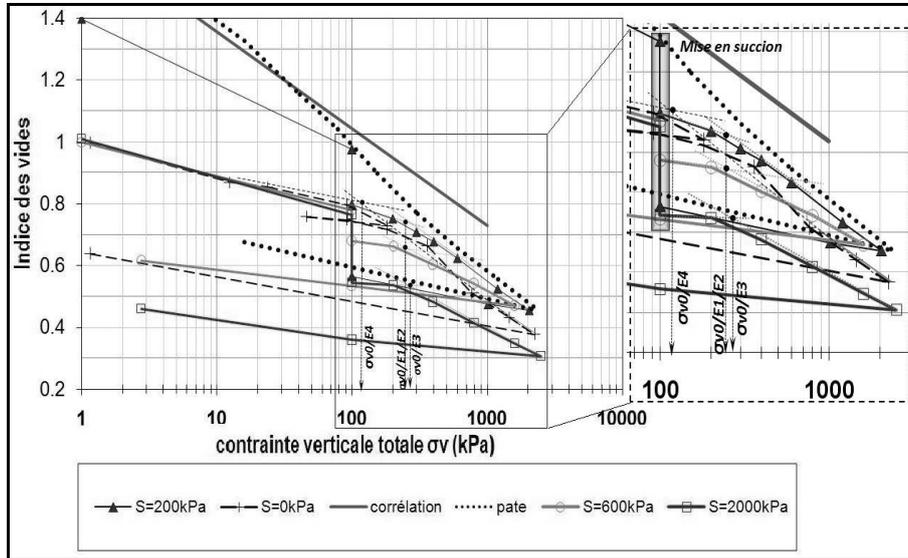


Figure 4. Essai oedométrique à succion contrôlée par osmose sur l'argile du noyau du barrage de Boughrara consolidé à 100kPa, (interprétation en contraintes totales).

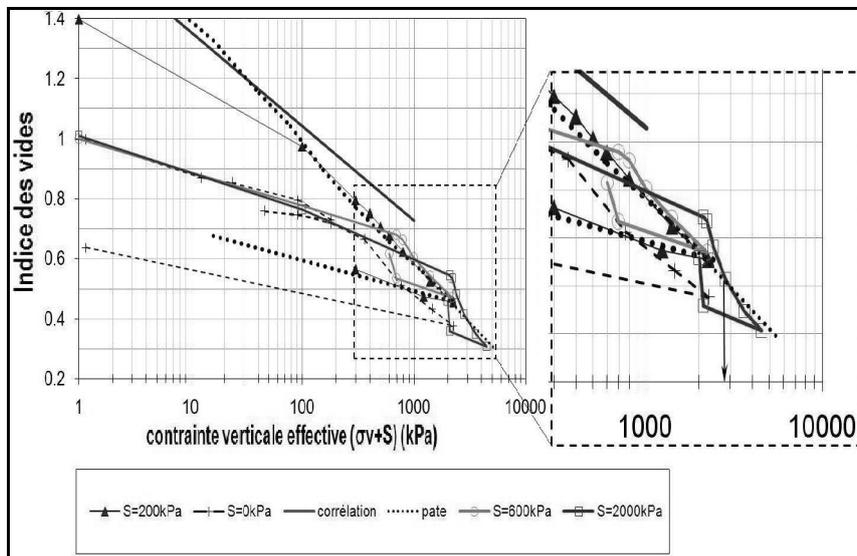


Figure 5. Essai oedométrique à succion contrôlée par osmose sur l'argile du noyau du barrage de Boughrara consolidé à 100kPa, (interprétation en contraintes effectives).

Les succions de 200kPa et 600kPa, sont insuffisantes pour désaturer le matériau de Boughrara, qui nécessite une succion de désaturation, en l'absence de contrainte, de l'ordre de 1000kPa, (Lachguer, 2007). Par contre le drainage de l'échantillon sous une succion de 2000kPa, provoque une légère désaturation de l'échantillon, conduisant à un dépassement de la droite NC saturée. L'augmentation du chargement diminue le volume des vides, provoquant une resaturation de l'échantillon ; et par conséquent la courbe rejoint la droite NC saturée.

8. Conclusion

L'utilisation d'un oedomètre osmotique à double échange, a permis de présenter les premiers résultats sur chemin de chargement déchargement à succion contrôlée de l'argile du noyau de barrage de Boughrara, consolidé à 100kPa. Cet oedomètre, mettant en œuvre la technique osmotique, permet d'imposer des succions allant jusqu'à 10MPa.

Les résultats obtenus ont montré un certain nombre d'aspects du comportement hydromécanique des sols non saturés, à savoir : i) le retrait du matériau soumis à un drainage est d'autant plus important que la succion imposée est élevée, ii) on constate que la contrainte de consolidation apparente augmente avec la succion, tandis que la pente $\lambda(s)$ diminue avec la succion, ce qui signifie que la succion rigidifie le sol. En ce qui concerne la pente de déchargement $\kappa(s)$, on a constaté qu'elle diminue en fonction de la succion.

L'interprétation des résultats en fonction de la contrainte effective a montré que les échantillons soumis à une succion inférieure à la succion de désaturation se regroupent d'une façon satisfaisante autour de la droite NC saturée, tandis que pour des valeurs de succion supérieures à la succion de désaturation, la courbe s'éloigne de la courbe NC saturée, pour la rejoindre à des valeurs de contraintes de chargement élevées. Ceci justifie une interprétation des résultats en contrainte effective. Ces essais seront complétés par des essais non saturés à des niveaux de succion plus élevés. On pourra ainsi compléter la caractérisation du comportement de ce matériau en vue de déterminer les paramètres de modèles rhéologiques, qui permettront enfin des modélisations fiables.

9. Bibliographie

- Alonso.E.E., Gens.A. Josa.A., « A constitutive model for partially saturated soils», Géotechnique, vol. 40, 1990, pp. 405-430.
- Barden L., Madedor, A.O., Sides, G.R, « Volume change characteristics of unsaturated clay», ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation. Div., 95 SM1, 1969, pp. 35-52.
- 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., « The principle of effective stress», *Teknisk Ukeblad*, no 39, pp 859-863.
- Cui, Y.J., Étude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique. Thèse de l'ENPC, France, 1993.
- Cui Y.J ; Delage P., « Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt». *Geotechnique*, vol 46, n°2, 1996, pp. 291-311.
- Cuisinier. O., Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 2002.
- Delage P., Suraj de Silva G.P.R. and Vicol T., « Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer», *7th Int. Conf. on Expansive Soils*, Dallas, 1992, Texas, pp. 206-211.
- Delage, P., Howat, M.D. Cui, Y.J, « The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay». *Engineering Geology*, vol 50, 1998, pp, 31-48.
- Escario, V., « Swelling of soils in contact with water at a negative pressure». *Proceeding. 2nd Int. Conference. on Engineering and Research on Expansive Clays*, Texas, 1969, pp. 207-217.
- Guiras-Skandaji, H., Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 1996.
- Kohgo.Y., Nakano.M..T. 1993a., « Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils», *Soils and Foundations* 33, No. 4, 1993a, pp. 49-63.
- Kohgo.Y., Nakano.M. Miyazaki .T., « Verification of the generalised elastoplastic model for unsaturated soils», *Soils and Foundations* 33, No. 4, 1993b, pp. 64-73.
- Lachguer, K., Mesure de la conductivité hydraulique dans les argiles non saturés-Application au noyau du barrage de Boughrara-. Mémoire de Magistère de l'université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2007.
- Lloret.A. Alonso.E.E., « State surfaces for partially saturated soils», *Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, San Fransisco, 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, 1968, pp. 432-448.
- Modaressi A. Aboubekr. N., « A unified approach to model the behavior of saturated and unsaturated soils», *Conference on computer methods and advances in geomechanics.* H.J.Siriwardane and M.M. Zaman (ed.), Balkema, 1994a.

- 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.
- Rampino C, Mancuso C, Vinale F., « Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results », Canadian Geotechnical journal, vol. 36, n 1, 1999, pp. 1-12.
- Taibi, S., Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative, étude expérimentale et modélisation. Thèse de Doctorat. École centrale de Paris, 1994.
- Williams J. and Shaykewich C. F., « An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matrix potential », Canadian Journal of Soil Science, vol. 102; n 6, 1968, pp. 394-398.
- Zerhouni.M.I., Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols - Application aux routes. Thèse de doctorat. École Centrale de Paris, 1991.

10. 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.