
Mesure de la conductivité hydraulique d'une argile non saturée de la région de Tlemcen

Karima Lachgueur* — **Nabil Abou-Bekr*** — **Said Taibi****

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, lachgueur_karima@yahoo.fr, 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*

RÉSUMÉ Le travail présenté a pour objectif la détermination de la conductivité hydraulique d'une argile utilisée dans la construction du noyau du barrage de Boughrara (ouest algérien) à l'aide de deux méthodes ; la méthode des dessiccateurs à solutions salines saturées et la méthode de Fredlund basée sur l'interprétation des courbes de rétention d'eau Deux méthodes différentes d'imposition de la succion ont été utilisées pour obtenir la courbe de rétention d'eau de l'argile étudiée ; solutions salines et solutions osmotiques.

ABSTRACT. The aim of the present work is the determination of the hydraulic conductivity function of a clayey material used in the construction of the core of the Boughrara dam (western Algerian), by two methods; the desiccators' method with saturated salt solutions and the method of Fredlund based on the exploitation of the water retention curve. Two methods of imposition of suction were used to determine the clay water retention curve; salt solutions and osmotic solutions.

MOTS-CLÉS : Conductivité hydraulique, argile non saturée, noyau de barrage, dessiccateurs, méthode de Fredlund, succion.

KEYWORDS: hydraulic conductivity, unsaturated clay, core of dam, desiccators, method of Fredlund, suction.

1. Introduction

La modélisation des transferts hydriques dans les sols fins non saturés nécessite la connaissance des paramètres hydrodynamiques à différents niveaux de succion, notamment la conductivité hydraulique. Il s'agit de déterminer les relations entre la perméabilité, le degré de saturation et la succion. Ces relations ne peuvent être déduites des propriétés fondamentales du sol, mais elles doivent être déterminées par une procédure expérimentale en analysant, en régime permanent ou transitoire, le bilan hydrique au cours d'une humidification ou d'un drainage du sol. La connaissance de ces relations constitue un préalable indispensable à toute modélisation.

Peu de données sont disponibles dans la littérature sur la perméabilité des matériaux poreux dans le domaine non saturé. L'objet de cet article est la présentation des valeurs de la perméabilité de l'argile de Boughrara (barrage de l'ouest algérien), déterminées en non saturé par deux méthodes ; la méthode des dessiccateurs et la méthode dite « Méthode de Fredlund ».

2. Matériau d'étude

Le matériau testé a été prélevé sur le noyau du barrage de Boughrara, situé à l'extrême Ouest de l'Algérie Nord Occidentale, à proximité (11 km) de Maghnia, ville frontière avec le Maroc, à 60 km à l'Ouest de Tlemcen et à 150 km au Sud Ouest de la ville portuaire d'Oran. Il a été mis en eau le 11 octobre 1998. Il a une capacité totale de 177 millions de m³ d'eau, sa hauteur est de 58 m, le volume régularisé est de 59 millions de m³. Le but de ce barrage est d'assurer la consommation en eau potable des villes avoisinantes et répondre aux besoins d'irrigation des terres agricoles.

Des essais d'identification physique, chimique et mécanique ont été effectués sur ce matériau. L'essai de compactage à l'Optimum Proctor Normal donne une valeur de densité maximale de 1.62, correspondant à une teneur en eau optimale de 21%. Le tableau 1 regroupe les résultats obtenus. Selon la classification USCS/LPC, l'argile de Boughrara est classée comme une argile peu plastique.

Le matériau a été préparé sous forme de sol compacté à l'Optimum Proctor Normal OPN ($\gamma_d/\gamma_w = 1.62$ et $w_{opt} = 21\%$). Par ailleurs, la valeur de la succion de l'argile compactée a été mesurée à l'aide de la technique indirecte du papier filtre (ASTM D 5298- 94) (Tableau 2).

Dans le but d'optimiser la durée des essais, les échantillons compactés ont été découpés en galettes de 10 mm d'épaisseur et 24 mm de diamètre.

Identification physique	Argile de Boughrara	Norme utilisée
granulométrie :		NF P 94-041
Gravier (%)	3	
Sable (%)	10	
Limon (%)	35	
Argile (% < 2 μm)	52	
% < 80 μm	90	NF P 94-057
d_{10} (μm)	0.22	
d_{60} (μm)	8.5	
d_{60}/d_{10}	38.64	
Limites d'Atterberg :		
Liquidité W_L (%)	48	NF P 94-051
Plasticité W_P (%)	20	
Indice de plasticité (%)	28	
Densité des grains solides (γ_s / γ_w)	2.6	NF P 94-054
Identification chimique		
Valeur de Bleu VB	4.68	NF P 94-068
Surface spécifique totale (m^2/g)	97.95	
Teneur en CaCO_3	14 %	NF P 94-048
Identification mécanique		
Proctor normal		
$\gamma_{d \text{ max}} / \gamma_w$	1.62	NF P 94-093
W_{opt} (%)	21	

Tableau 1. Identification de l'argile de Boughrara

Etat initial de l'échantillon	W (%) du papier filtre	s (Mpa)
OPN	32.33	0.85

Tableau 2. Succions initiales mesurées sur les éprouvettes compactées

3. Techniques de contrôle et de mesure de la succion

La succion est une grandeur physique difficile à mesurer, et diverses approches sont nécessaires pour couvrir toute la gamme des succions rencontrées dans les sols et qui peuvent atteindre plusieurs centaines de méga Pascals. Cette difficulté technique est probablement l'une des causes du manque de données expérimentales relatives au comportement des sols non saturés.

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la succion. Ces méthodes sont regroupées en deux catégories selon qu'il s'agit d'une méthode de mesure proprement dite ou d'une méthode d'imposition et de maintien de la succion à une

valeur prédéterminée. Dans ce qui suit, on donne une brève description des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail.

3.1 Techniques de contrôle de la succion

-La méthode osmotique consiste à mettre l'échantillon de sol en contact avec une solution de polyéthylène glycol PEG 6000 à travers une membrane semi perméable en triacétate de cellulose Spectra/Por® N°3, de poids moléculaire obstacle MWCO (mass of water cut off) égal à 3500Da (Dalton). Cette technique permet de balayer une gamme de succion variant de 50 kPa à 9 MPa. La concentration, indépendante de la masse molaire du PEG, est déterminée à partir de la relation linéaire [1] pour des succions $s < 6.25$ MPa (Delage et al, 1998).

$$s = 11c^2 \quad (c \text{ en g PEG /g eau}) \quad [1]$$

La mise en oeuvre de la technique osmotique pour la détermination de la rétention d'eau se fait suivant le principe de la figure 1.

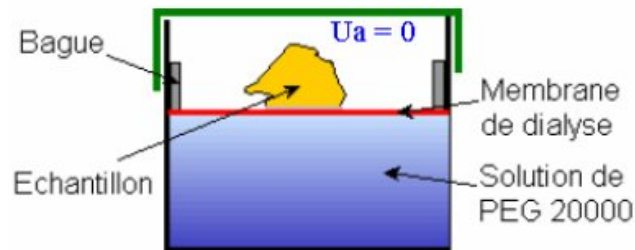


Figure 1. Mise en oeuvre de la technique osmotique (Fleureau & Kheirbek-Saoud, 2004)

-La méthode des solutions salines saturées est utilisée pour imposer des succions variant de 6 à 342 MPa. Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée dans un dessiccateur, et à laisser les transferts d'eau s'effectuer sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre. L'humidité relative peut être imposée en plaçant dans le dessiccateur une solution saline saturée (Figure 2). La succion imposée par le sel utilisé est reliée à l'humidité relative par la loi de Kelvin [2]:

$$\frac{s}{\gamma_w} = \frac{RT}{gM} \ln \frac{H}{100} \quad [2]$$

Avec :

R : constante des gaz parfaits [= 8.32 J/°K].

T : température absolue [°K].

M : masse moléculaire de l'eau [= $1.8 \cdot 10^{-3}$ kg].

H : humidité relative en pourcents.

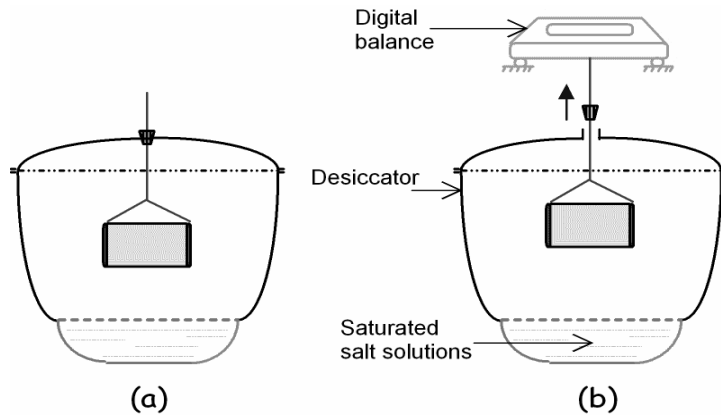


Figure 2. Contrôle de la succion par phase vapeur à l'aide d'un dessiccateur et de solution saline saturée (Sayad Gaidi., 2003)

3.2 Technique de mesure de la succion

La méthode du papier-filtre est une méthode simple et pratique pour la mesure de la succion, utilisable dans n'importe quel laboratoire disposant d'un système de pesée précis au 1/10000e de gramme. Son principe est représenté sur la figure 3.

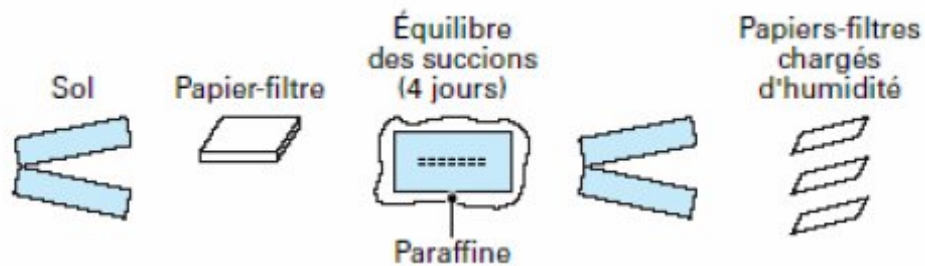


Figure 3. Méthode du papier filtre (Delage & Cui, 2000)

Cette technique consiste à mettre en contact de l'échantillon un papier filtre Whatman N°42, une fois l'équilibre hydrique entre le sol et le papier filtre atteint, la teneur en eau du papier filtre est alors corrélée à la succion de l'échantillon suivant la norme ASTM D 5298- 94.

4. Mesure de la perméabilité par la méthode des dessiccateurs

Le principe consiste à suspendre un échantillon de sol dans le dessiccateur et à mesurer les échanges d'eau par évaporation entre l'échantillon et l'environnement ambiant du dessiccateur en fonction du temps. Pour assurer un transfert unidimensionnel (axial), l'échantillon est paraffiné sur son contour et relié à une balance d'une précision de 10^{-2} g qui permet de suivre la variation de son poids dans le temps. La figure 4 présente un schéma descriptif de confection des éprouvettes de sol.

Les échantillons sont soumis par étapes successives, à différentes valeurs de la succion en utilisant plusieurs solutions salines saturées (Tableau 3). Les volumes d'eau échangés à chaque palier de succion sont alors représentés par une évolution linéaire dans le plan $[t, \text{Ln}(V_{wT} - V_w(t))]$ et la pente M correspondante est reliée au coefficient de diffusivité D_w par la relation [3].

$$D_w = \frac{l^2 M}{\pi^2} \quad [3]$$

l : hauteur de l'échantillon.

Le coefficient de perméabilité est calculé alors à l'aide de l'expression [4] :

$$k(\theta) = \frac{D_w(\theta)}{\partial \psi / \partial \theta} = \frac{D_w(\theta) V_{wT}}{\Delta \psi V_T} \quad [4]$$

V_{wT} : Volume d'eau total échangé par l'échantillon pour un palier de succion donné.

$V_w(t)$: Volume d'eau échangé par l'échantillon en fonction du temps pour un palier de succion donné.

V_T : Volume total de l'échantillon.

θ : Teneur en eau volumique.

ψ : potentiel capillaire donné par la relation [5].

$$\psi = \frac{\rho_w}{\gamma_w} [m] \quad [5]$$

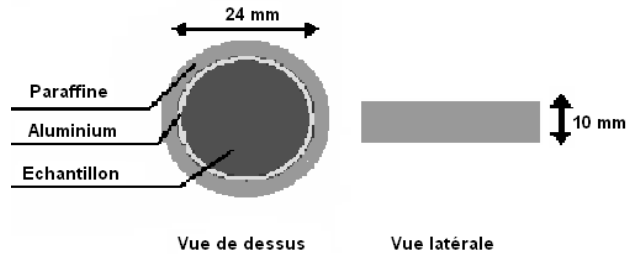


Figure 4. Schéma descriptif de confection des éprouvettes de sol

Solution	Concentration (g de sel/500 ml d'eau)	Succion (MPa)
NaCl	38	6.3
NaCl	54	9
NaCl	75.5	12.6
(NH ₄) ₂ SO ₄	375.66	29.9
NaCl	360	38.15
NaNO ₂	410.75	57.76
CaCl ₂ , 2H ₂ O	730	156.22
H ₂ SO ₄	1 litre	342.64

Tableau 3. Concentrations des solutions salines saturées (Sayad Gaidi, 2003)

Par ailleurs, la perméabilité saturée des échantillons compactés est mesurée dans une cellule œdométrique, les coefficients de perméabilité sont déduits à partir du coefficient de consolidation C_v et du module œdométrique E' suivant la relation [6]:

$$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{E'} \quad [6]$$

5. Détermination de la perméabilité par la méthode de Fredlund

La méthode dite de Fredlund (Fredlund et al, 1994), consiste à exploiter la courbe de rétention du matériau SWRC et d'en déduire, via un modèle capillaire, la fonction de conductivité hydraulique $k(S_r)$. La démarche consiste à subdiviser la courbe de rétention (Figure 5), représentée dans le plan $\Theta(s)$, suivant l'axe Θ en n segments égaux, Θ est définie par la relation [7]:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [7]$$

La fonction de perméabilité $k(\Theta)$ est donnée par les expressions [8] et [9] :

$$k(\Theta_i) = \frac{K_s}{K_{sc}} A_d \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i) \cdot (s)_j^{-2}] \quad [8]$$

$$k_{sc} = A_d \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i) \cdot (s)_j^{-2}] \quad [9]$$

$i = 1, 2, \dots, m$

Avec:

$k(\Theta_i)$: fonction de perméabilité à une teneur en eau volumique effective Θ_i correspondant à l' $i^{\text{ème}}$ intervalle.

i : Numéro de l'intervalle qui augmente avec la diminution de la teneur en eau volumique.

k_s : Coefficient de perméabilité à saturation, mesuré au laboratoire.

k_{sc} : Coefficient de perméabilité calculé, à saturation.

m : Nombre total d'intervalles entre la teneur en eau volumique à saturation θ_s et la teneur en eau volumique minimale θ_r sur la courbe caractéristique sol-eau.

$(s)_j$: succion correspondant au point du centre du $j^{\text{ème}}$ intervalle.

A_d : Paramètre d'ajustement.

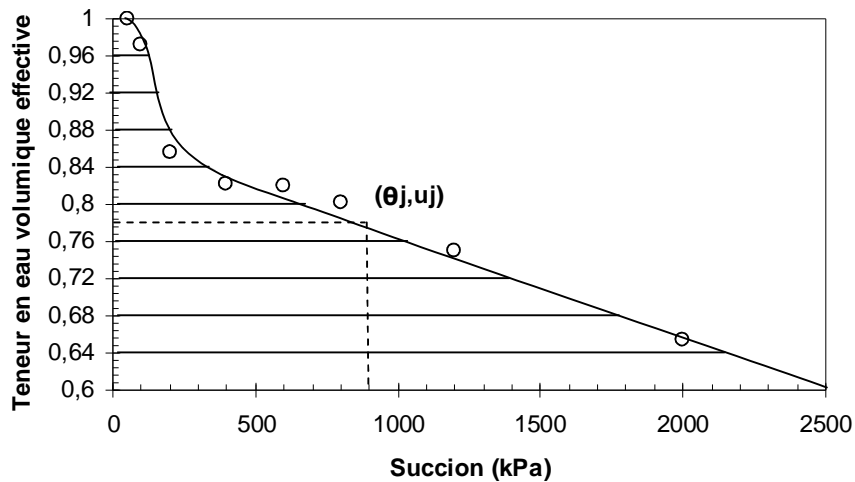


Figure 5. Courbe de drainage de l'argile compactée à OPN

6. Résultats expérimentaux

6.1 Méthode des dessiccateurs

La figure 6 regroupe les résultats des essais effectués sur l'argile de Boughrara préparée initialement à l'optimum proctor normal OPN. La variation de la perméabilité est représentée dans les plans $[\log k, \log s]$ et $[\log k, S_r]$.

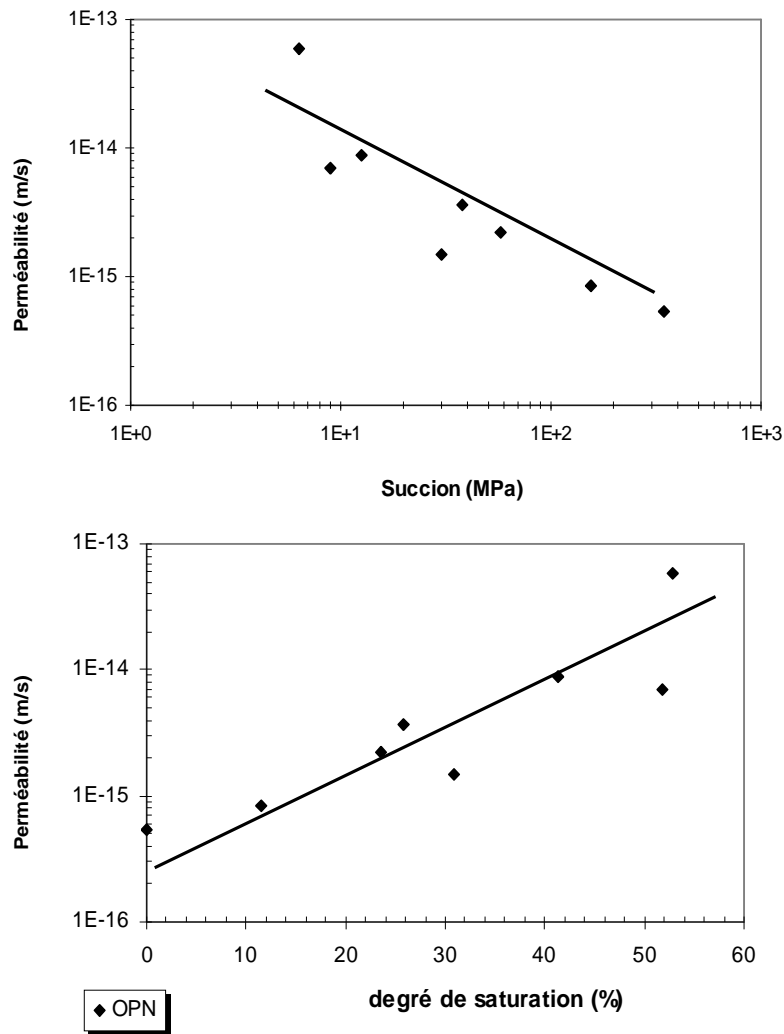


Figure 6 : Courbes de perméabilité mesurée par la méthode des dessiccateurs pour l'argile compactée à OPN

6.2 Méthode de Fredlund

Se basant sur l'interprétation de la courbe de rétention par la méthode de Fredlund, la figure 7 présente la variation du coefficient de perméabilité de l'argile compactée à OPN, en fonction de la succion. On constate que la décroissance de la perméabilité avec la succion présente une allure linéaire dans ce plan.

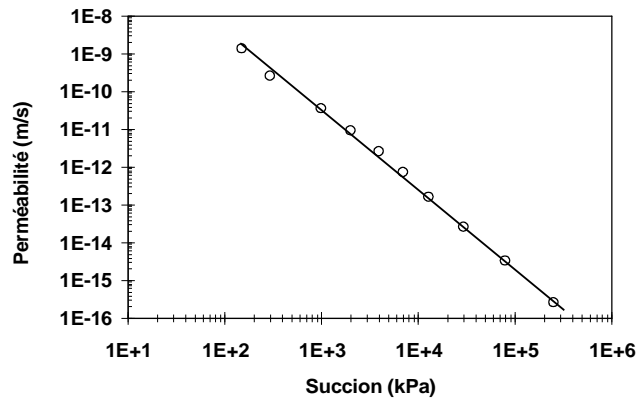
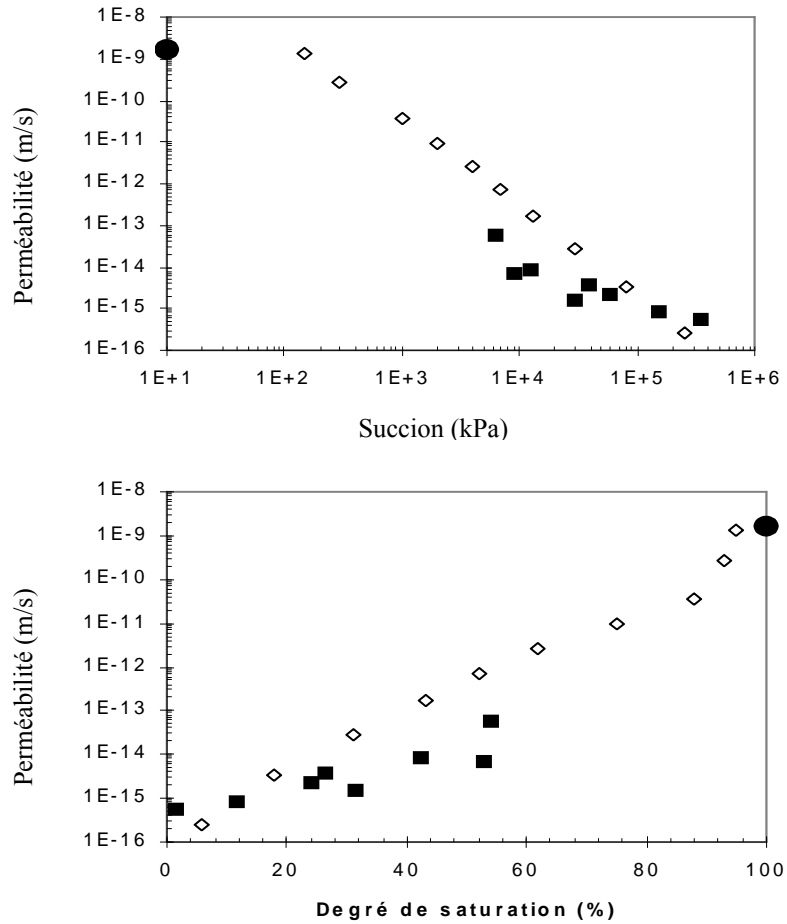


Figure 7. Courbe de perméabilité calculée par la méthode de Fredlund pour l'argile compactée à OPN

6.3 Superposition des résultats obtenus par les deux méthodes

La figure 8 présente une comparaison des fonctions $k(s)$ et $k(S_r)$ déterminées par la méthode de Fredlund et celle des dessiccateurs à solutions salines. On remarque que ces deux méthodes donnent des valeurs très proches dans le domaine des faibles degrés de saturation ($S_r < 30\%$) et l'écart observé pour des degrés de saturation plus élevés est de l'ordre d'un facteur 10 environ. Par ailleurs, l'association de ces deux méthodes permet de balayer la totalité du domaine de saturation.



Dessiccateurs (OPN) \diamond Fredlund (OPN) \bullet Perméabilité à saturation

Figure 8. Comparaison entre les valeurs de perméabilité calculées par la méthode de Fredlund à partir des courbes de rétention et celles mesurées à l'aide de la méthode des dessiccateurs

7. Conclusion

La méthode des dessiccateurs et celle de Fredlund ont été utilisées dans le but d'étudier la relation entre la conductivité hydraulique, la succion et le degré de saturation, de l'argile de Boughrara.

Les techniques utilisées présentent l'avantage d'être simple à mettre en oeuvre et requièrent peu de moyens. Néanmoins, les temps de mesure, raisonnables pour ce matériau, peuvent être beaucoup plus longs pour des matériaux moins perméables.

L'imposition de la succion assurée par les deux techniques, solutions osmotiques et solutions salines saturées, a permis d'atteindre une valeur de succion de l'ordre de 3400 bars et de pouvoir mesurer de très faibles valeurs de perméabilité (jusqu'à 10^{-16} m/s).

8. Bibliographie

- ASTM D 5298-94., « Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using filter paper » – Annual book of ASTM standards, Vol. 04.09, 1994, p. 154-159.
- DELAGE P., HOWAT M.D. & CUI Y.J., « The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay ». Engineering Geology, Elsevier, Vol. 50, 1998, p. 31-48.
- DELAGE P. & CUI Y.J., « L'eau dans les sols non saturés » in Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C301, 2000.
- FLEUREAU J.M., KHEIRBEK -SAOUD S., « Retrait et gonflement des sols soumis à un cycle de drainage humidification ». Ecole Central de Paris, France, 2004.
- FREDLUND D.G., XING A., HUANG S., « Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve ». Can. Geotech. J., Vol. 31, 1994, p. 533-546.
- LACHGUEUR K., ABOU-BEKR N., TAIBI S., « Mesure de la conductivité hydraulique d'une argile non saturée par la méthode des dessiccateurs ». Actes de la 2^{ème} Conférence Africaine des Jeunes Géotechniciens, Tunisie, 2007.
- SAYAD GAIDI C., « Ecoulements dans les milieux poreux peu perméables saturés et non saturés ». Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France, 2003.

9. 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.