

---

# Techniques de mesure de la conductivité hydraulique saturée et non saturée de l'argile de Mers El Kébir (Algérie)

Souad Amel Bourokba Mrabet\* — Abdelkader Hachichi\* — Said Taïbi\*\* — Jean Marie Fleureau\*\*\*

\* Département de Génie Civil, Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf Oran, Algérie, sa\_bourok@yahoo.fr, hachichi\_geotech@yahoo.fr

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

\*\*\* Laboratoire de Mécanique des sols, structures & matériaux, Ecole Centrale Paris & CNRS, Grande voie des vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France, jean-marie.fleureau@ecp.fr

---

**RÉSUMÉ.** Cet article présente un travail expérimental effectué sur l'argile de Mers El Kébir afin de contribuer à l'étude des problèmes d'écoulement rencontrés à travers les sols. L'étude consiste en premier lieu à la détermination de la conductivité hydraulique dans le domaine saturé d'échantillons compactés à l'optimum Proctor en utilisant plusieurs méthodes : le perméamètre à charge variable, l'oedoperméamètre, en régime permanent et en régime transitoire (essai Pulse ou choc impulsif) et par la suite faire une comparaison entre ces différentes méthodes. En second lieu on mesure la conductivité hydraulique dans le domaine non saturé en utilisant la technique des dessiccateurs (méthode de Gardner) dont le principe est de mesurer les échanges d'eau entre l'échantillon et l'environnement soumis à une humidité relative imposée par des solutions salines saturées afin d'établir les relations entre conductivité hydraulique, la teneur en eau, le degré de saturation et la pression capillaire

**ABSTRACT.** This paper presents an experimental work performed in a natural clay from Mers El Kebir (Algeria). This was conducted to study the seepage problems through soils. In this study we measured first the hydraulic conductivity of saturated samples, compacted to the optimum Proctor, using several methods: the falling-head permeability test, oedopermeameter, a steady state and transient test (Pulse test) and then we compare between these different methods. Secondly we measure the hydraulic conductivity of unsaturated samples using the salt solution technique (Gardner method). The principle of this technique is to measure the exchange of water between the sample and the environment under a relative humidity due to saturated salt solutions. This will allow us to establish relationships between the hydraulic conductivity, the water content ( $\omega$ ), the degree of saturation ( $S_r$ ) and the capillary pressure ( $u_c$ ).

**MOTS-CLÉS :** argile, Pulse test, solutions salines, conductivité hydraulique, saturé, non saturé.

**KEYWORDS :** clay, pulse test, salt solutions, hydraulic conductivity, saturated, unsaturated

---

## **1. Introduction**

L'étude des problèmes de rétention et de transfert de l'eau dans les sols saturés et non saturés nécessite la connaissance de la conductivité hydraulique. Elle permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrages bâtis tels que les ouvrages en sol compacté (remblais routiers, barrages en terre, barrières d'étanchéité de centres de stockage de déchets, drainage et pompage des nappes). De plus la présence de couches argileuses joue un rôle fondamental dans la protection des eaux souterraines. Les mesures de conductivité hydraulique des sols non saturés sont nécessaires et importantes, délicates à réaliser et peu répandues.

Actuellement Plusieurs techniques existent, comme le rapporte la littérature, pour déterminer la conductivité hydraulique dans le domaine saturée et non saturé :

Dans le domaine saturé, la méthode du perméamètre à charge variable pour les sols fins et à charge constante pour les sols grossiers basée sur la loi de Darcy, l'oedoperméamètre, essai de choc impulsif dit Pulse Test et l'essai harmonique.

Dans le domaine non saturé, non pouvons citer la méthode des profils instantanés, la méthode à contre pression d'air, la méthode osmotique, et la méthode des solutions salines saturées.

L'objectif du présent article est de présenter des exemples d'utilisation de la technique de mesure de la conductivité hydraulique dans le domaine saturé (le perméamètre à charge variable, l'oedoperméamètre, en régime permanent et en régime transitoire (essai Pulse ou choc impulsif)) et dans le domaine non saturé par la méthode de Gardner, 1956. Cette technique se base sur l'utilisation de dessiccateurs à solutions salines afin de réaliser des mesures à des pressions capillaires élevées et donc souvent à de faibles degrés de saturation. Cette façon de faire permet l'obtention de relations entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau, le degré de saturation et la pression capillaire.

## **2. Localisation et identification du matériau utilisé**

Les essais ont été réalisés sur l'argile de Mers El Kébir (Nord Ouest de l'Algérie). Le matériau de Mers El Kébir a fait l'objet de recherches antérieures (Hachichi & Fleureau, 1999 ; Bourokba, 2001 ; Hachichi et al, 2007). Les argiles du Miocène proviennent d'un site localisé dans la dépression de Mers el Kébir. Il s'agit en fait d'un fossé d'effondrement entre le Djebel Aïdour au Sud-Est et le Djebel Santon vers le Nord Ouest.

Les sédiments d'origine marine se sont déposés en une couche assez épaisse (300 m) durant le Tortonien. La formation est principalement constituée d'illite et de monmorillonite, avec un taux appréciable de carbonate de calcium.

Les résultats des essais d'identification sont rassemblés dans le Tableau 1. D'après les classifications LCPC<sup>1</sup> /USCS<sup>2</sup>, la marne de Mers El Kébir est peu plastique ( $A_p$  (LCPC) = CL (USCS)). Son activité  $A_c$  est élevée avec un pourcentage d'éléments inférieurs à 2  $\mu\text{m}$  de 26 %. La surface spécifique totale déduite de l'essai au bleu de méthylène par la formule de Tran Ngoc Lan, 1977 est de 157  $\text{m}^2/\text{g}$ . A l'optimum Proctor normal (OPN), la densité sèche est de 1,63 et la teneur en eau est de 20%.

Paramètres		Unité	Caractéristiques du matériau utilisé
Masse volumique des grains solides (NF P94-054)	$\rho_s$	$\text{Mg}/\text{m}^3$	2.67
Limite de liquidité (NF P94-051)	$w_L$	%	49
Limite de plasticité (NF P94-051)	$w_p$	%	21,5
Indice de plasticité (= $w_L - w_p$ )	IP	%	27.5
Pourcentage d'éléments inférieurs à 2 $\mu\text{m}$ (NF P94-057)	F2	%	26
Activité (= IP / F2)	$A_c$		1.10
Valeur de bleu de méthylène (NF P94-068)	VBS	%	9.0
Surface spécifique totale = 21 VBS (Tran Ngoc Lan, 1977)	SST	$\text{m}^2/\text{g}$	157
Teneur en carbonate de calcium (NF X31-106)	$\text{CaCO}_3$	%	18
Masse volumique sèche à l'OPN (NF P94-093)	$\rho_{d \text{ max}}$	$\text{Mg}/\text{m}^3$	1.63
Teneur en eau optimale (NF P94-093)	$w_{\text{opt}}$	%	20

**Tableau 1.** Paramètres d'identification de l'argile étudiée.

### 3. Préparation des échantillons

Les essais ont été effectués sur des échantillons remaniés. Après avoir broyé finement le sol, la poudre est mélangée à l'eau de façon homogène puis compactée sous presse à vitesse lente (1,27 mm/min) dans un moule de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur. La teneur en eau des échantillons est fixée à 20% et leur densité sèche à 1,63 (teneur en eau et densité sèche de l'optimum Proctor).

<sup>1</sup> Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

<sup>2</sup> Unified Soil Classification System

Pour les mesures de conductivité hydraulique saturée l'échantillon est placé dans une bague en acier inoxydable de 71 mm de diamètre et de 27 mm de hauteur pour le perméamètre à charge variable, 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur pour l'oedoperméamètre et 35 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Pour le perméamètre à charge variable, les essais sont réalisés par application d'une charge hydraulique à la face inférieure de l'échantillon après avoir saturé la pierre poreuse (circulation d'eau désaérée par ouverture de la purge latérale). Après la saturation totale de l'échantillon, l'eau commence à sortir de l'ajutage.

Pour la conductivité hydraulique en régime permanent et régime impulsionnel l'échantillon est placé dans une cellule triaxiale il est saturé par application d'une contre pression tout en mesurant le coefficient de Skempton.

Pour les mesures de conductivité hydraulique non saturée, un chemin de drainage a été suivi sur des échantillons compactés à l'OPN ( $\rho_d = 1.63 \text{ Mg/m}^3$  ;  $w_{opt} = 20\%$ ).

#### 4. Techniques de mesure de la conductivité hydraulique saturée

##### 4.1. Méthode du perméamètre à charge variable

Cette procédure d'essai est généralement employée pour les sols fins qui présentent des coefficients de perméabilité assez faibles ( $<10^{-7} \text{ m/s}$ ), elle est basée sur la loi de darcy. La conductivité hydraulique est donnée par la formule suivante :

$$k = 2,3 \frac{a}{A} \frac{l}{T} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad [1]$$

A : section de l'échantillon ; a : section du tube ; T : temps d'écoulement ; l : hauteur de l'échantillon ;  $h_1$  : charge hydraulique à l'instant  $t_1$ .

	$\Delta h$ (cm)	T (s)	K (m/s)
Argile de Mers El Kebir	3,5	180000	$1,04 \cdot 10^{-10}$

**Tableau 2.** Valeur de la conductivité hydraulique par le perméamètre à charge variable.

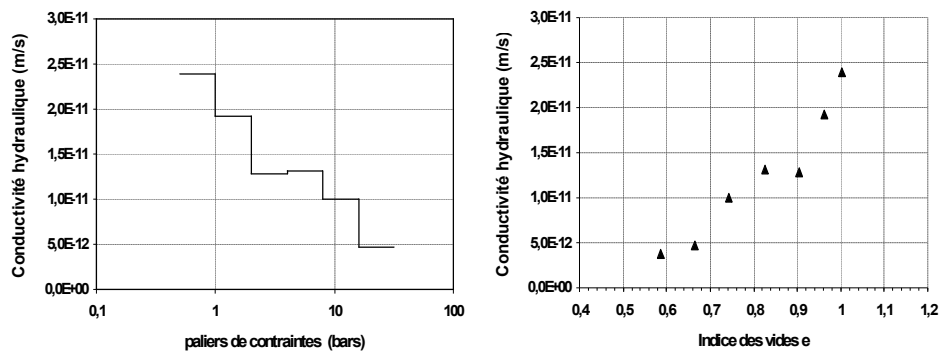
#### 4.2. L'oedoperméamètre

L'interprétation de l'essai oedométrique est basée sur le module oedométrique et le coefficient de consolidation qui est déduit de la courbe de consolidation. Le sol est consolidé sous une contrainte verticale et on calcule la perméabilité à partir du taux de consolidation. La mesure de  $k$  indirecte utilise la théorie de consolidation suivante :

$$k = \frac{C_v \gamma_w}{E} \quad [2]$$

$C_v$  : coefficient de consolidation       $E'$  : module oedométrique

La figure 1 représente la conductivité hydraulique en fonction de la contrainte appliquée. Nous remarquons bien que la valeur obtenue au début de l'essai est de  $2,39 \cdot 10^{-11}$  m/s.

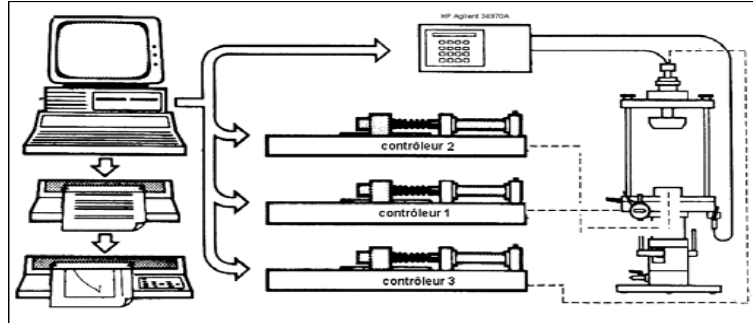


**Figure 1.** Courbes de conductivité hydraulique en fonction des paliers de contraintes et de l'indice des vides

#### 4.3 Mesure de la conductivité hydraulique en régime permanent

Le dispositif expérimental est composé d'une cellule triaxiale équipée de 3 contrôleurs de pression- volume et de capteur de pression. L'ensemble est piloté par ordinateur via une centrale d'acquisition (Figure 2).

Pour les essais en régime permanent, les volumes entrants et sortants sont mesurés en fonction du temps sous des différences de pression de 100KPa . La courbe de variation des volumes entrants ( $V_e$ ) et sortants ( $V_s$ ) présente une variation linéaire en fonction du temps figure 3.



**Figure 2.** Cellule triaxiale avec contrôleurs de pression-volume (Sayad, Gaidi2003).

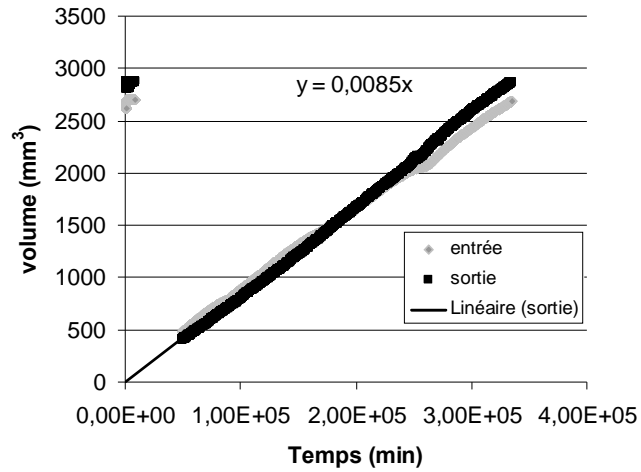
La perméabilité est déduite de la loi de Darcy :

$$k = \frac{Qh \gamma_w}{S \Delta u_c} \quad [3]$$

Q : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s) ; S: Section de l'échantillon (m<sup>2</sup>) ;

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau ; h : Hauteur de l'échantillon (m)

$\Delta u_c$  : Différence de pression entre les deux extrémités de l'échantillon (kPa)

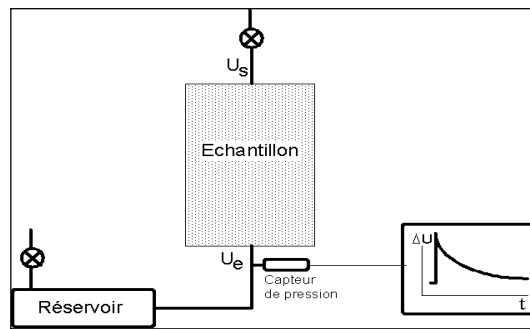


**Figure 3.** Variation du volume entrant et sortant en fonction du temps

La conductivité hydraulique obtenue est de  $4,25 \times 10^{-10}$  m/s.

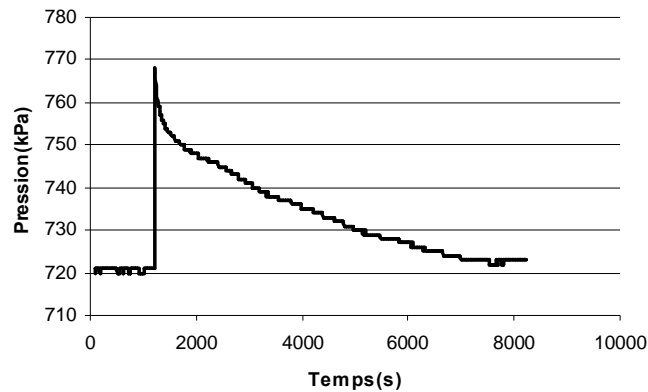
#### 4.4 Mesure de la conductivité hydraulique en régime impulsionnel « Pulse Test »

La méthode consiste à soumettre l'échantillon à une pression différentielle instantanée à ses extrémités (Figure 4), à l'instant  $t$  on impose une légère augmentation de la pression dans l'un des deux réservoirs. L'observation de la dissipation de la pression en fonction du temps permet la détermination de la perméabilité. Cette technique a été introduite initialement par Brace et al (1968) et depuis elle a été reconnue comme une méthode fiable pour la détermination de la conductivité hydraulique.



**Figure 4.** Principe du « Pulse Test » (Sayad, Gaidi, 2003)

Pour vérifier la reproductibilité de l'essai, la figure 5 montre le signal réalisé. Nous remarquons bien une augmentation brusque de la pression suivie d'une chute progressive.



**Figure 5.** Courbe de dissipation de la pression dans l'échantillon en fonction du temps pour la pression de l'entrée = 720 kPa et un incrément de pression de 50 kPa

La conductivité hydraulique est donnée par :

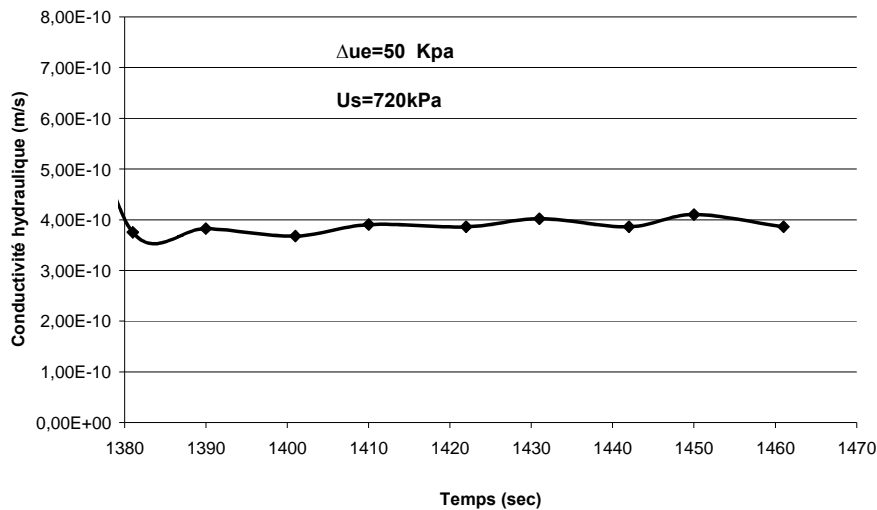
$$k = \frac{\Delta V_w h}{\Delta t S \left( \frac{u_e - u_s}{\gamma_w} + h \right)} \quad [4]$$

$\Delta V_w$  : Volume d'eau infiltré (m<sup>3</sup>) ; S : Section de l'échantillon (m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau ;  $U_e$  : Pression à la base de l'échantillon

$U_s$  : Pression à la tête de l'échantillon ;  $\Delta t$  : Intervalle de temps (s)

h : Hauteur de l'échantillon (m)



**Figure 6.** Courbe du coefficient de perméabilité mesuré en fonction du temps pour la pression de l'entrée = 720 KPa et un incrément de pression de 50kPa.

La figure 6 illustre l'évolution de la perméabilité en fonction du temps. On remarque que la conductivité hydraulique en fonction du temps se stabilise vers  $K = 4,68 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ .



## 5. Techniques de mesure de la conductivité hydraulique non saturée

### 5.1. Mesure de la conductivité hydraulique dans des dessiccateurs

Le but de l'essai est de mesurer la conductivité hydraulique d'un échantillon de sol par échange hydrique avec l'environnement. Ceci s'opère dans un dessiccateur à solution saline saturée dans le but de maintenir une humidité relative  $H_0$  et donc une pression capillaire  $u_{c0}$  constantes. Les variations hydriques sont obtenues par simples pesées de l'échantillon.

$$\frac{uc}{\gamma_w} = \frac{RT}{gM} \ln \frac{H}{100} \quad [5]$$

R : constante des gaz parfaits [= 8,32 J/K°] ; T : température absolue [°K] .

M : masse moléculaire de l'eau [= 1,8\*10<sup>-3</sup> kg] ; H : taux d'humidité relative.

Les échantillons analysés sont sous forme de galettes de 10mm d'épaisseur et 35 mm de diamètre et sont paraffinés sur leur contour diamétral afin d'assurer un écoulement unidimensionnel. L'échantillon est relié à une balance de précision 10<sup>-3</sup> g permettant de suivre la variation de son poids dans le temps et de calculer ses caractéristiques d'état (teneur en eau, degré de saturation, indice des vides...). Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 7.

L'équation générale des transferts a la forme suivante :

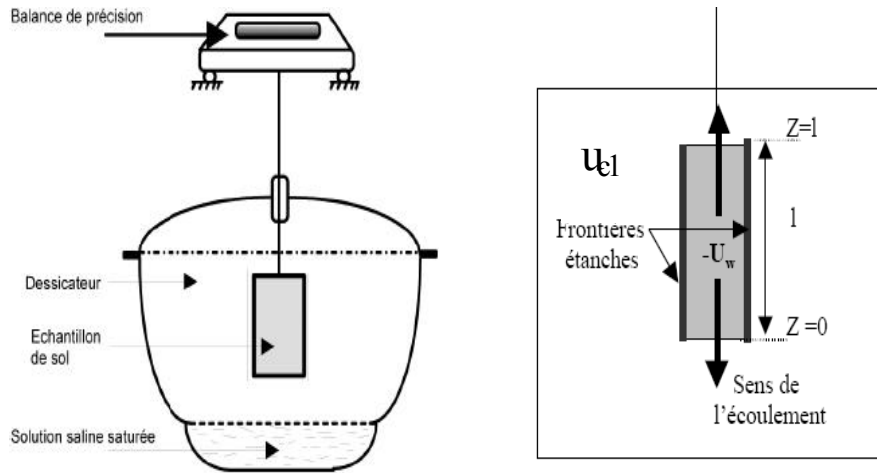
$$\frac{\partial u_c}{\partial t} = D(\theta) \frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} \quad [6]$$

La résolution est très difficile mais en utilisant le schéma de principe de la figure 7, cela conduit à donner la relation suivante:

$$k(\theta) = \frac{D(\theta)}{\frac{\partial u_c}{\partial \theta}} = \frac{D(\theta) V_{wT}}{\Delta u_c V_T} \quad [7]$$

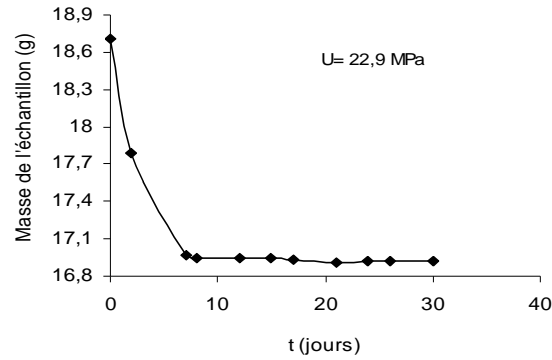
Avec D : diffusivité,  $\Delta u_c$  : incrément de pression,  $V_T$  : volume final de l'échantillon

Comme indiqué précédemment, les mesures de conductivité hydrauliques ont été faites sur le chemin de drainage à partir de l'OPN.

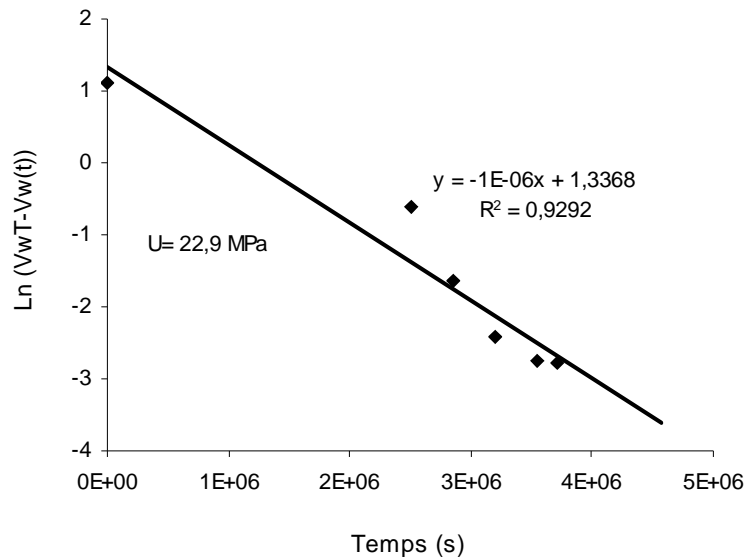


**Figure 7.** Schéma de principe de l'essai de conductivité hydraulique et des échanges d'eau entre l'échantillon et l'enceinte du dessiccateur (Sayad. Gaidi, 2003)

Les échantillons ont été pesés régulièrement pour pouvoir suivre l'évolution de la quantité d'eau échangée en fonction du temps, La figure 8 donne un exemple de la cinétique obtenue. Nous remarquons que la majeure partie des échanges d'eau entre l'échantillon et la solution saline du dessiccateur s'effectue pendant les 10 premiers jours La conductivité hydraulique est déterminée pour chaque échantillon en représentant l'évolution temporelle de la quantité  $\ln(V_{wT} - V_w(t))$  en fonction du temps. La figure 9 montre un exemple de résultat pour les échantillons compactés à l'OPN.



**Figure 8.** Evolution de la masse de l'échantillon en fonction du temps



**Figure 9.** Exemple de résultat de l'évolution de  $\ln (VwT - Vw (t))$  en fonction du temps

Afin de mieux comprendre l'évolution de la conductivité hydraulique, celle-ci a été représentée dans les plans  $[\log(u_c), k]$ ,  $[S_r, k]$  et  $[w, k]$  sur la figure 10. On constate que la conductivité hydraulique diminue quand la pression capillaire augmente et que ces résultats sont globalement en accord avec ceux de nombreux chercheurs (Vicol, 1990 ; Ed Diny, 1993 ; Fleureau et al., 1994 ; Taibi et al., 2009).

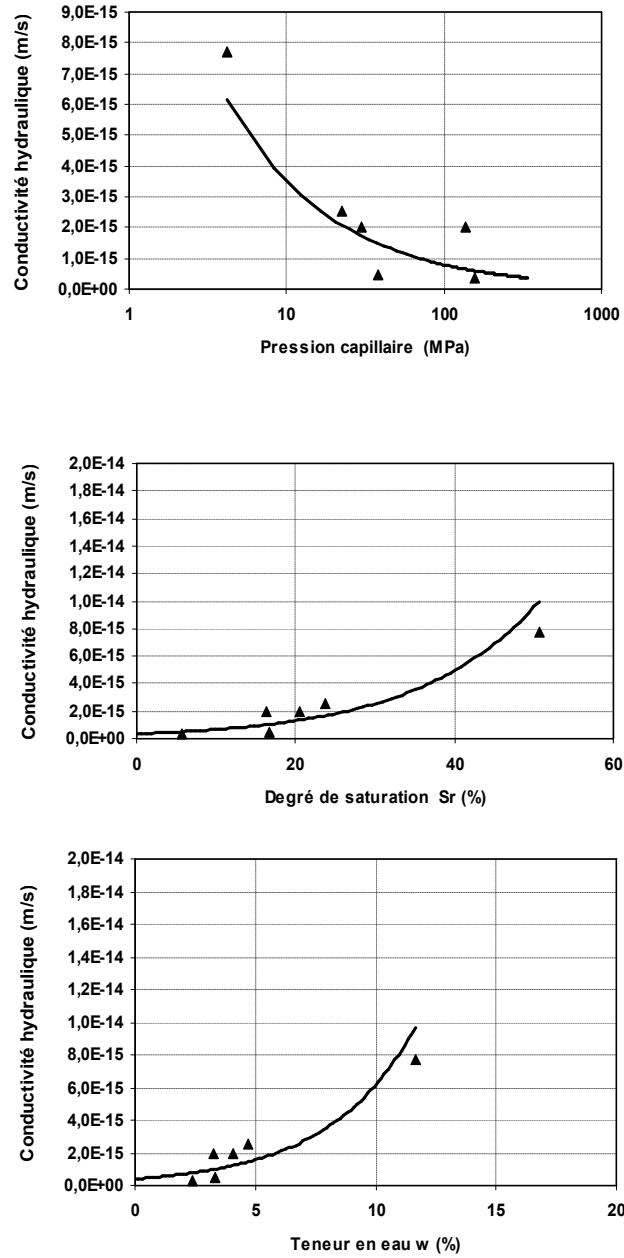


Figure 10. Evolution de la conductivité hydraulique en fonction de  $\log(u_c)$ ,  $S_r$  et  $w$

## 6. Conclusion

La mesure de la conductivité hydraulique saturée de l'argile de Mers el kébir par les quatre méthodes citées ci-dessus présente quelques différences surtout concernant l'oedoperméamètre. Amar et Depuis, 1973 Cités par Lachgeur, 2007 ont montré que les calculs de  $k$  issus de cet essai étaient 10 à 1000 fois différents à ceux déterminés par une mesure directe mais elle a l'avantage de pouvoir suivre l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de l'indice des vides. La mesure directe au perméamètre à charge variable présente une différence de 25 % comparée à celle mesurée en régime permanent et impulsionnel son inconvénient réside dans la durée de la saturation (deux mois environ).

La mesure de la conductivité hydraulique des sols non saturés est délicate et encore assez peu répandue actuellement. Dans cette étude nous présentons des résultats obtenus au moyen de la technique de mesure dans les dessiccateurs à solutions salines. Celle-ci présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et requiert peu de moyens mais elle nécessite des temps d'essais relativement longs et une grande précision dans les mesures. Elle permet d'explorer le domaine des faibles degrés de saturation et doit être complétée par d'autres techniques pour les mesures dans le domaine proche de la saturation.

L'allure des courbes de conductivité hydraulique obtenues au cours de l'essai dans les dessiccateurs est cohérente avec celles fournies par la littérature pour des matériaux similaires (limon compacté, vase, argile sableuse...).

## 7. Bibliographie

- Bourokba S A., « Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région d'Oran », Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Med Boudiaf, Oran, Algérie, 2001.
- Brace W. F, Walsh J. B., Frangos W. T., « Permeability of granite under high pressure », *J. Geophys.Res.*, Vol. 73, n° 6, pp 2225-2236, 1968.
- Corey E C., « Measurement of water and air permeability in unsaturated soil », *Soil Science Society of America proceedings*, Vol. 21, n° 1, pp 7-11, 1957.
- Ed Diny S., « Etude expérimentale des transferts hydriques et du comportement mécanique d'un limon non saturé », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 177 pages, 1993.
- Fleureau J.-M., Taibi S., « New apparatus for the measurement of water- air perm abilities », *Proceedings of 1st International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta, Canada, BiTech publishers LTD. W. D. Carrier (ed), pp. 227-232, 1994.
- Gardner W. R., « Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data », *Soil Science Society of America*, Vol.20, pp. 317- 320, 1956.

- Hachichi A., Fleureau J.-M., « Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie », *Revue Française de Géotechnique*, n° 86, 1999.
- Hachichi A., Bourokba S A., Fleureau J.-M., « Stabilisation chimique des sols gonflants de la région d'Oran », *Revue Française de Géotechnique*, n° 118, 2007.
- Hamilton J. M., Daniel D. E., Olsen R. E., « Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils » *Permeability and ground water contaminant transport, STP 746. American society for testing and materials*, Philadelphia, pp. 182-196, 1981.
- Lachgueur K., « Mesure de la conductivité hydraulique dans les argiles non saturées – Application au noyau du barrage Boughrara », Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2007.
- Sayad Gaidi C., « Ecoulement dans les milieux poreux peu perméables saturés et non saturés », Thèse de doctorat de l'Université de Havre, France, 2003.
- Taibi S., Bicalho K. V., Sayad-Gaidi C., Fleureau J.-M., « Measurements of unsaturated hydraulic conductivity functions of two fine-grained materials », *Soils & Foundations*, Vol. 49, N°2, pp. 181-191, Japanese Geotechnical Society, 2009.
- Tran Ngoc Lan. 1977. «Nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène», *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 88, Mars - Avril, pp. 136-137.
- Vicol T., « Comportement hydraulique et mécanique d'un sol fin non saturé, Application à la modélisation », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 216 pages, 1990.