



ASPECTS THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS D'INFILTRATION EN PLACE

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ASPECTS OF FLOW TESTS IN SITU

Réception : 16/10/2018

Acceptation : 13/11/2018

Publication : 08/01/2019

ZADJAOUI Abdeldjalil¹, HOUMADI Youcef²¹Faculté de Technologie, Université de Tlemcen (Algérie), email : a.zadjaoui@gmail.com²Smart Structures Laboratory (SSL), Centre Universitaire Ain Témouchent, (Algérie).

Résumé : Les conditions de saturation complète se produisent rarement in situ lors de l'infiltration dans une zone non saturée. Ceci est dû au piégeage d'air lors de l'écoulement. Dans ces conditions, nous avons plutôt une saturation au champ caractérisée par la présence d'air bloqué dans certains pores. Cet air a tendance à s'opposer à l'écoulement et, par conséquent, réduit la conductivité hydraulique du sol. Les méthodes de mesure in situ évaluent donc une perméabilité dans des conditions de saturation au champ (norme ASTM D 5126-90). Ainsi, la perméabilité à la saturation au champ est estimée à la moitié de celle à saturation complète. Etant donné que la mesure au laboratoire s'effectue sur des échantillons de faibles dimensions, la mesure est loin d'être représentative. Les essais in situ, bien que difficiles, sont préférables dans la mesure où ils offrent l'opportunité de tester le sol sur un volume plus représentatif et d'inclure l'écoulement à travers les macro-pores et les fissures. Le présent article se veut comme un éclaircissement des connaissances dans ce sens. Après une présentation des méthodes et principes suivis pour l'interprétation des essais d'infiltration, des instruments permettant la quantification de l'infiltration in situ seront décrits. Par la suite, les auteurs exposeront les résultats d'un cas réel. Des analyses, commentaires et interprétations seront donnés avec des conclusions utiles à la pratique de l'ingénieur.

Mots - clés : Conductivité hydraulique, Charge, Succion, In-situ, Infiltration, Perméamètre.

Abstract: Full saturation conditions rarely occur in situ when infiltrating an unsaturated zone, this is due to air trapping during flow. In these conditions we have rather a saturation in the field characterized by the presence of air blocked in some pores, this air tends to oppose the flow and consequently reduces the hydraulic conductivity of the soil. In situ measurement methods therefore evaluate permeability under saturation conditions in the field (ASTM D 5126-90). Thus, the permeability to saturation in the field is estimated at half that of full saturation. Since the measurement in the laboratory is carried out on samples of small dimensions, the measurement is far from being representative. In situ tests, although difficult, are preferable in that they offer the opportunity to test the soil on a more representative volume and to include flow through the macropores and cracks. This paper is intended as a clarification of the knowledge in this sense, after a presentation of the methods and principles followed for the interpretation of the infiltration tests, instruments allowing the quantification of the infiltration in situ will be described, the authors expose the results of a real case. Analyzes, comments and interpretations will be given with conclusions useful to the practice of the engineer.

Keywords: Hydraulic conductivity, Charge, Suction, In-situ, Infiltration, Permeameter.

1-Introduction et état de l'art

Dans le but de réaliser une mesure fiable et représentative de la conductivité hydraulique, des essais d'infiltration in situ se sont développés afin de contourner les inconvénients des mesures effectuées au niveau des laboratoires.

Philip (1985) [8] prévoit que le flux issu d'un puits creusé dans un sol non saturé dans lequel on maintient un niveau d'eau constant est un processus tridimensionnel qui doit atteindre rapidement le régime permanent à l'intérieur d'une zone de dimension finie. Cette hypothèse a été validée expérimentalement par Amraoui 1993 [1].

La détermination de la conductivité hydraulique à saturation à partir de mesures d'infiltration réalisées dans un puits cylindrique a été proposée pour la première fois par Magnan et Zadjaoi (2006) [7]. Ils ont pris pour hypothèse un milieu saturé et un gradient de charge unitaire. L'analyse de Glover ne décrit pas correctement l'écoulement car elle considère un sol uniformément saturé, alors que le flux à partir d'un puits crée un petit bulbe saturé au voisinage du puits qu'un plus grand volume non saturé englobe, Stephens et Neuman a, b 1982 ; Philip, 1985 [8], Elrick et al., 1989 selon Cazaux (1998) ([2]). Cette analyse ne tient compte ni de l'influence de la gravité hors du puits Amraoui (1993) [1] ni de celle des propriétés capillaires de la zone non saturée Didier et al., (1996) [3] qui doivent pourtant affecter les valeurs de Q . Pour prendre en compte la composante non saturée du flux, des modifications ont été apportées à l'équation de Glover. Pour ce faire, des techniques numériques ont été employées pour résoudre l'équation de Richards pour un flux axisymétrique sous conditions saturées et non saturées. Amraoui et al. (1993) [1] ont développé une solution analytique en remplaçant le coefficient de forme de Glover ($C'G$) de l'équation de Glover par un terme ($C's$). Philip (1985) [8] et Reynolds et al. (1986) [9] ont proposé des expressions analytiques du flux prenant en compte le terme de flux non saturé sous la forme générique.

Philip (1985) [8] a utilisé une approximation géométrique des frontières de forme cylindrique du puits en remplaçant le puits par un demi-ellipsoïde.

Villey (2000) [13] a comparé les modèles de Reynolds et al. (1987) [10] et de Philip (1985) [8] et a constaté qu'ils fournissaient des relations similaires entre Q , k_{sat} et ϕ_m . Seuls les coefficients changent entre les deux relations. En conséquence, c'est la relation de Reynolds et al. (1985) [8] qui est la plus utilisée actuellement pour l'interprétation des essais d'infiltration.

2- Matériau et matériel utilisé dans cette étude.

Les objectifs de cet article sont multiples et concernent d'une part, la qualification des sols du gisement de la société BENTAL (Bentonite Algérie) au niveau de la ville Hammam Bouhrara de leurs aptitudes à se laisser infiltrer par l'eau et d'autre part, l'évaluation de l'intérêt des techniques alternatives dans la conception et le dimensionnement des ouvrages dans la région.

Des essais in situ ont été réalisés. Ils ont pour but de quantifier les paramètres de l'infiltration tels que la conductivité hydraulique du sol à l'état saturé et son potentiel d'écoulement matriciel qui représente la contribution de la capillarité à l'écoulement lors de l'infiltration.

2.1- Caractéristiques du sol utilisé

Les caractéristiques d'identification sont résumées dans le Tableau 1. La surface spécifique S_p déterminée à l'aide de l'essai au bleu est de $749,18 \text{ cm}^2/\text{g}$ ($VBS = 7,39$), donc il s'agit d'une argile ayant une minéralogie type montmorillonite (Magnan, 1998).

Tableau 1 : Principales caractéristiques physiques.

Table 1 : Main physical characteristics.

γ_s/γ_w	γ_{s0}/γ_w	w_{opt} (%)	w_l (%)	w_p (%)	I_p (%)	VB	% CaCO ₃	% MO
2,66	1,29	18,79	125,78	62,07	63,71	7,39	45	4,15

En conclusion, le sol en question est une argile marneuse faiblement organique très plastique classe (fO-At) selon la classification LCPC.

2.2- Dispositif et procédure expérimentale

L'infiltromètre à simple anneau permet de mesurer de faibles débits. Il sera donc utilisé dans cette étude. Le principe de l'essai consiste à mesurer, en fonction du temps, la quantité d'eau infiltrée en millimètre (mm) ainsi que la vitesse d'infiltration d'eau dans le sol. Au fur et à mesure que le sol se sature, cette vitesse diminue et tend asymptotiquement vers une valeur constante qui traduit l'établissement d'un régime d'écoulement permanent au sein du sol. La mise en place du dispositif ainsi que la procédure d'essai ont été une tâche délicate malgré la simplicité apparente. Trois essais d'infiltration à différentes charges hydrauliques (10, 15 et 20 cm) ont été réalisés.

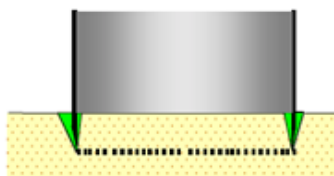


Figure 1 : Schéma du principe.

Figure 1 : Diagram of the principle.



Photo 1 : Dispositif de mesure d'infiltration.

Photo 1 : Infiltration measuring device.

3-Analyses et interprétations des résultats

3.1- Volume infiltré et infiltration cumulée

La Figure 2 représente les données relatives au volume infiltré dans le sol au cours du temps. Cette figure montre nettement que la quantité d'eau infiltrée augmente rapidement, d'autant plus que la charge hydraulique est importante. Par contre, la Figure. 3 présente les résultats des trois essais. Ces courbes donnent la cinétique d'infiltration. Elles montrent

nettement que l'augmentation de la charge hydraulique se traduit par un accroissement de la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol. Ces courbes illustrent donc l'influence de la charge hydraulique imposée sur le processus d'infiltration.

Les allures linéaires des courbes d'infiltration, qui définissent l'obtention du régime d'écoulement permanent, sont obtenues à partir de la durée de 69 mn pour le premier essai qui correspond à la charge hydraulique de 20 cm. Cette durée devient plus importante pour de faibles charges ($h_0 = 10$ cm). Cette constatation permet de souligner, qu'au cours des premiers instants d'infiltration, le phénomène diffusionnel qu'on attribue à la succion initiale du sol, l'emporte sur celui de la convection qui fait intervenir les forces de gravités et la charge extérieure. En général, la durée de ce phénomène diffusionnel est d'autant plus importante que la teneur en eau initiale du sol (ou le degré de saturation initial) est plus faible.

Au cours de ces essais d'infiltration, les charges hydrauliques positives jouent le même rôle que les forces de succion. Elles sont couplées aux forces de gravitation et agissent au profit de la vitesse d'avancement du front d'humidification.

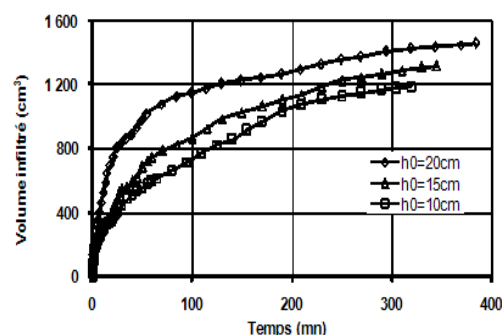


Figure 2 : Evolution du volume d'eau infiltré.

Figure 2: Evolution of the volume of infiltrated water.

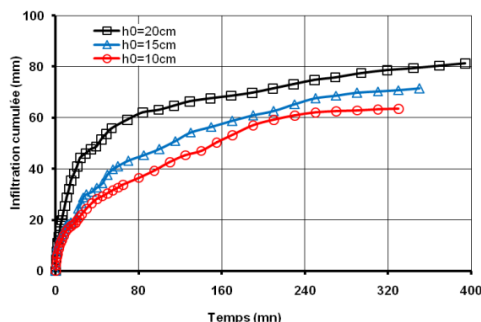


Figure 3 : Evolution de l'infiltration en fonction du temps.

Figure 3: Evolution of infiltration as a function of time.

3.2- Volume infiltré et infiltration cumulée

L'évolution en fonction du temps du débit d'infiltration obtenue pour chaque essai est représentée sur la Figure 4. Quel que soit la charge appliquée, les débits élevés au début diminuent avec le temps jusqu'à ce qu'un régime permanent soit établi. Les débits élevés, correspondant à une charge hydraulique de 20 cm, augmentent avec la charge. En effet, quand la charge augmente, la contribution au flux de la composante hydrostatique devient importante par rapport à celle de la capillarité faisant ainsi accroître le débit. Pour mieux apprécier cette illustration, le détail de la Figure 4 est représenté sur les deux figures suivantes (5 et 6).

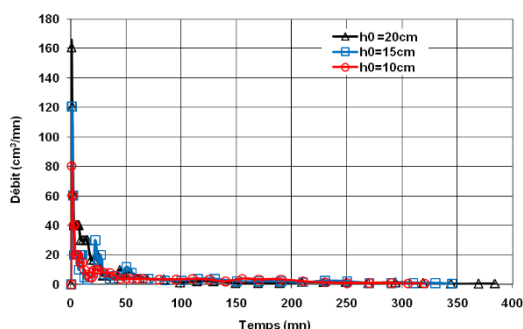


Figure 4 : Evolution du débit en fonction du temps

Figure 4 : Evolution of the flow as a function of time

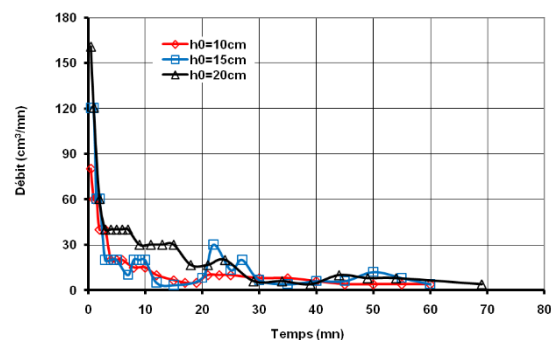


Figure 5 : Evolution du débit en fonction du temps [0, 80 mn].

Figure 5: Evolution of the flow as a function of time [0, 80 mn].

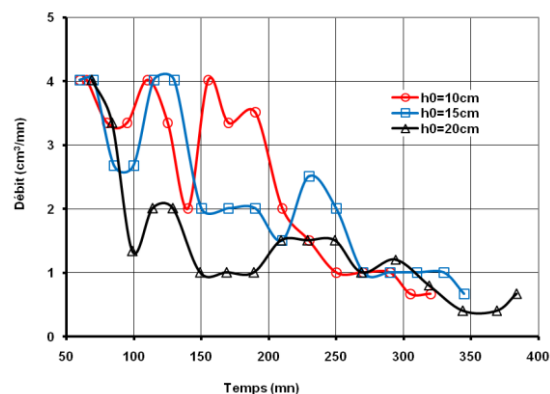


Figure 6 : Evolution du débit en fonction du temps [80, 500 mn].

Figure 6 : Evolution of the flow as a function of time [80, 500 mn].

3.3- Caractéristiques hydrodynamiques du sol

Le mode opératoire d'infiltromètre à simple anneau ouvert préconise l'analyse de Richard qui concerne la décharge en régime permanent d'un puits cylindrique dans un sol non saturé. Elle tient compte de toutes les forces qui contribuent à l'écoulement tridimensionnel de l'eau dans le sol.

$$C'Q = \underbrace{2\pi H^2 k_{sat}}_{(1)} + \underbrace{C' \pi a^2 k_{sat}}_{(2)} + \underbrace{2\pi H \phi_m}_{(3)} \quad (1)$$

où a = rayon du puits (m) ; H = charge hydraulique appliquée (m) ; ϕ_m = potentiel d'écoulement matriciel (m^2) ; k_{sat} = conductivité à la saturation (m/s) ; Q = débit d'infiltration en régime permanent (m^3/s) ; C' = facteur de forme, sans dimension qui dépend premièrement du rapport H/a mais aussi de k_{sat}/ϕ_m . Il est obtenu par la lecture d'abaques donnant le facteur en fonction du rapport H/a pour trois sols types distincts (sables, limons structurés et argiles, argiles non structurées) Zadjiaoui (2009) [12] et Villey (2000) [13].

Le terme (1) de l'Eq (1) définit la poussée hydraulique de l'eau dans le sol due à la pression hydrostatique de l'eau dans le puits. Le terme (2) représente la force gravitaire exercée par l'eau dans le puits. Le terme (3) représente la traction matricielle de l'eau due aux forces capillaires du sol environnant sur l'eau du puits. A l'aide d'infiltromètre à simple anneau ouvert, trois charges H_1 , H_2 et H_3 sont appliquées dans un puits. Q_1 , Q_2 et Q_3 sont les débits d'infiltration correspondants mesurés en régime stabilisé. $H_1 = 10$ cm $Q_1 = 5,024.10^{-9} m.s^{-1}$; $H_2 = 15$ cm $Q_2 = 8,373.10^{-9} m.s^{-1}$; $H_3 = 20$ cm $Q_3 = 10,718.10^{-9} m.s^{-1}$

3.4- Analyse de Glover

Cette analyse néglige la contribution à l'écoulement de la gravité et de la succion, l'Eq (1) se réduit à son premier terme, la conductivité hydraulique est donnée par : $k_{sat} = C'Q/2\pi H^2$.

Les valeurs des perméabilités obtenues par l'analyse de Glover (1953) [6] ($a = 7,6$ cm) pour chaque essai sont représentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats obtenus par l'analyse de Glover.

Table 2 : Summary of the results obtained by the Glover analysis.

Charge appliquée (cm)	H = 10 cm	H = 15 cm	H = 20 cm
C'	0.592	0.817	1.006
$K_{sat} (m.s^{-1})$	$4.73.10^{-8}$	$4.83.10^{-8}$	$4.28.10^{-8}$

3.5- Analyse de Richard

Selon Richard (1931) [11] la conductivité à saturation au champ se calcule à partir de :

$$k_{sat} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$$

avec

$$G_2 = \frac{H_1 C'_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C'_2 - H_2 C'_1)]}$$

$$G_1 = G_2 \frac{H_2 C'_1}{H_1 C'_2}$$

Le potentiel d'écoulement matriciel ϕ_m qui traduit la contribution de la composante capillaire à l'écoulement dans le sol initialement non saturé est donné par $\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2$

avec

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C'_2) C'_1}{2\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C'_2 - H_2 C'_1)]}$$

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(2H_1^2 + a^2 C'_1) C'_2}{(2H_2^2 + a^2 C'_2) C'_1} \right]$$

Le rapport k_{sat}/ϕ_m définit un paramètre appelé α^* qui caractérise la nature et la porosité du sol. Pour un rayon de puits égal à 7,6 cm et un sol argilo-marneux, nous obtenons les facteurs C' suivants : 0,7 ; 0,9 et 1,15 respectivement pour $H = 10, 15$ et 20 cm.

La résolution simultanée entre H_1 et H_2 est la suivante : $k_{sat} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 = 5,08.10^{-8} m/s$

avec

$$G_2 = \frac{H_1 C'_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C'_2 - H_2 C'_1)]} = 20,27 m^2$$

$$G_1 = G_2 \frac{H_2 C'_1}{H_1 C'_2} = 23,65 m^{-2}$$

Pour trois charges appliquées, trois valeurs de k_{sat} sont ainsi obtenues. De la même façon, la résolution simultanée en termes de potentiel ϕ_m nous donne :

pour la résolution entre H_1 et H_2 , on obtient $\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 = -4,6.10^{-10} m^2 s^{-1}$

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C'_2) C'_1}{2\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C'_2 - H_2 C'_1)]} = 3,94 m^{-1}$$

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(2H_1^2 + a^2 C'_1) C'_2}{(2H_2^2 + a^2 C'_2) C'_1} \right] = 2,42 m^{-1}$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau 3).

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats obtenus par résolution simultanée.

Table 3: Summary of the results obtained by simultaneous resolution.

	H ₁ et H ₂	H ₁ et H ₃	H ₂ et H ₃
$k_{sat} (m.s^{-1})$	5,08.10 ⁻⁸	4,36.10 ⁻⁸	3,67.10 ⁻⁸
$\phi_m (m^2.s^{-1})$	- 4,6.10 ⁻¹⁰	4,69.10 ⁻¹⁰	1,78.10 ⁻⁹
$\alpha^* = k_{sat}/\phi_m (m^{-1})$	-----	93,0	20,64

Sur trois valeurs de ϕ_m calculées, une est négative. D'emblée le k_{sat} correspondant est éliminé. Il reste alors les k_{sat} et ϕ_m obtenus par la résolution entre H₁ et H₃ et entre H₂ et H₃ dont les rapports donnent respectivement un α^* égal à 93 et 20,6 m⁻¹.

3.6- Analyse de Laplace

Cette analyse ne tient pas compte de la contribution de la succion à l'écoulement dans le sol. Dans ce cas, l'Eq (1) se limite à ses deux termes. La conductivité hydraulique est donnée par :

$$k_{sat} = \frac{C' Q}{\pi(2 H^2 + a^2 C')}$$

Les valeurs des perméabilités obtenues par l'analyse de Laplace pour chaque essai sont : $k_{sat} (m.s^{-1}) = 4,66.10^{-8}$; $4,77.10^{-8}$ et $4,52.10^{-8}$ respectivement pour la charge la plus faible à la charge la plus élevée.

3.7- Analyse de d'Elrick

Cette analyse proposée par Elrick, 1989, tient compte de tous les paramètres de l'équation (1). Les valeurs mesurées de α^* varient généralement entre 1 m⁻¹ et 100 m⁻¹.

Le calcul de la perméabilité à la saturation et du potentiel d'écoulement matriciel par la méthode d'Elrick préconise l'utilisation des équations suivantes :

$$k_{sat} = \frac{C' Q}{2 \pi H^2 + \pi a^2 C' + \frac{2 \pi H}{\alpha^*}}$$

$$\phi_m = \frac{C' Q}{(2 \pi H^2 + \pi a^2 C') \alpha^* + 2 \pi H}$$

Nous avons fait varier α^* entre 1 et 12 m⁻¹ pour observer son influence sur k_{sat} et ϕ_m comme présentés respectivement dans le tableau 4 et le tableau 5.

Tableau 4 : k_{sat} en fonction de H et de α^* .

Table 4: k_{sat} according to H et and α^*

	$k_{sat} (m.s^{-1})$		
α^*	H=10 cm	H=15 cm	H= 20cm
	$C' = 0,7$	$C' = 0,9$	$C' = 1,15$
1	5.10 ⁻⁹	6,85.10 ⁻⁹	8,06.10 ⁻⁹
2	9,02 .10 ⁻⁹	1,98.10 ⁻⁸	1,36.10 ⁻⁸
4	1,51.10 ⁻⁸	1,91.10 ⁻⁸	2,1.10 ⁻⁸
6	1,95.10 ⁻⁸	2,39.10 ⁻⁸	2,55.10 ⁻⁸
8	2,28.10 ⁻⁸	2,73.10 ⁻⁸	2,87.10 ⁻⁸
10	2,54.10 ⁻⁸	3.10 ⁻⁸	3,09.10 ⁻⁸
12	2,75.10 ⁻⁸	3,19.10 ⁻⁸	3,27.10 ⁻⁸

Tableau 5 : ϕ_m en fonction de H et de α^* **Table 5:** ϕ_m according to H and α^*

α^*	ϕ_m (m.s ⁻¹)		
	H=10 cm	H=15 cm	H= 20cm
1	5.10 ⁻⁹	6,85.10 ⁻⁹	8,06.10 ⁻⁸
2	4,51.10 ⁻⁹	6.10 ⁻⁹	6,84.10 ⁻⁹
4	3,78.10 ⁻⁹	4,79.10 ⁻⁹	5,25.10 ⁻⁹
6	3,25.10 ⁻⁹	4.10 ⁻⁹	4,26.10 ⁻⁹
8	2,85.10 ⁻⁹	3,41.10 ⁻⁹	3,58.10 ⁻⁹
10	2,54.10 ⁻⁹	3.10 ⁻⁹	3,09.10 ⁻⁹
12	2,29.10 ⁻⁹	2,65.10 ⁻⁹	2,72.10 ⁻⁹

3.8- Analyse de Gardner

Cette méthode suppose que l'écoulement est dû uniquement à la composante capillaire et dans ce cas l'Eq (1) se limite à son dernier terme. Elle est utilisée pour évaluer le potentiel d'écoulement matriciel. Ce dernier s'écrit comme suit : $\phi_m = \frac{C'Q}{2\pi H}$. Les valeurs des potentiels

d'écoulement matriciel obtenues par l'analyse de Gardner pour les différentes charges sont : ϕ_m (m².s⁻¹) = 5,6.10⁻⁹; 7,98.10⁻⁹ et 9,8.10⁻⁹. La conductivité hydraulique et le potentiel d'écoulement matriciel ont été évalués avec les différentes méthodes d'analyse cités précédemment à savoir, l'analyse de Glover qui suppose que l'écoulement est dû uniquement à la pression hydrostatique ; l'analyse de Laplace qui tient compte de la gravité et de la pression hydrostatique dans le processus d'écoulement ; la méthode des équations simultanées (ou analyse de Richard) et l'analyse d'Elrick qui tiennent compte à la fois des composantes hydrostatique, gravitaire et capillaire dans le processus d'écoulement.

L'analyse de Gardner (1956, 1958)[4, 5] a été également utilisée pour évaluer le potentiel d'écoulement matriciel. Cette méthode suppose que l'écoulement est dû uniquement à la composante capillaire.

Le tableau 6 résume les perméabilités obtenues pour les différentes charges d'eau appliquées et en utilisant les différentes méthodes d'analyse

Tableau 6 : Coefficients de perméabilité à la saturation obtenus par différentes méthodes.**Table 6 :** Permeability coefficients at saturation obtained by different methods.

Calcul du coefficient de perméabilité k_{sat} (m.s ⁻¹)				
Charge en (cm)	Glover	Laplace	Equations simultanées	Elrick
10	4,73.10 ⁻⁸	4,66.10 ⁻⁸	-----	2,75.10 ⁻⁸
15	4,83.10 ⁻⁸	4,77.10 ⁻⁸	5,08.10 ⁻⁸	3,19.10 ⁻⁸
20	4,28.10 ⁻⁸	4,52.10 ⁻⁸	3,67.10 ⁻⁸	3,27.10 ⁻⁸

La perméabilité ainsi calculée est peu sensible à la charge appliquée. Cependant, cette conclusion n'est pas vraie dans le cas d'une analyse des équations simultanées. Cette faible sensibilité de la perméabilité à la charge d'eau appliquée ne présente pas en réalité une tendance bien définie (Figure 7).

Le coefficient de perméabilité calculé par l'analyse de Glover et celle de Laplace est presque le même. Ceci signifie que la contribution à l'écoulement de la composante gravitaire est faible. Par rapport à l'analyse d'Elrick, ces deux méthodes d'analyse surestiment la valeur de k_{sat} du fait qu'elles ne tiennent pas compte de la contribution de la composante capillaire à l'écoulement qui est très importante au début de l'infiltration. Les valeurs des perméabilités obtenues par la méthode des équations simultanées se rapprochent relativement plus de celles obtenues par l'analyse de Glover, alors que l'analyse d'Elrick donne de faibles perméabilités.

Le potentiel d'écoulement matriciel ϕ_m traduit la contribution de la succion initiale du sol à l'écoulement dans le puits. Les valeurs obtenues par les différentes méthodes d'analyse sont dans la Figure 8. Pour la première et la plus faible charge d'eau appliquée, l'analyse de Gardner et celle d'Elrick aboutissent à des valeurs de ϕ_m relativement proches. Ceci est dû au fait que pour de faibles charges, la contribution à l'écoulement

de la composante de succion est importante. Pour de fortes charges appliquées, l'analyse de Gardner surestime le potentiel d'écoulement car elle néglige la contribution au flux de la pression hydrostatique et de la gravité.

On remarque que les valeurs de potentiel matriciel ϕ_m obtenues par l'analyse des équations simultanées sont négatives, cela témoigne de l'hétérogénéité du profil vertical au sein du puits.

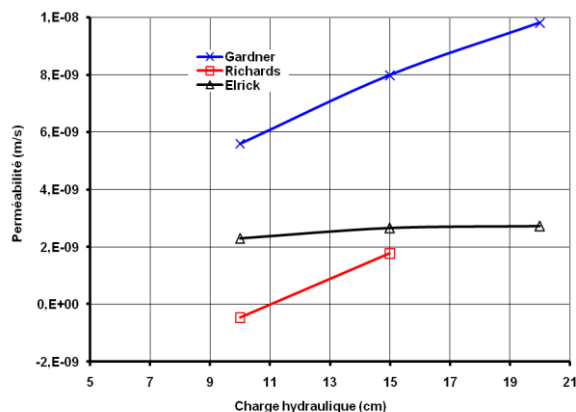


Figure 7 : Variation de k_{sat} en fonction de H .

Figure 7 : Variation k_{sat} according to H .

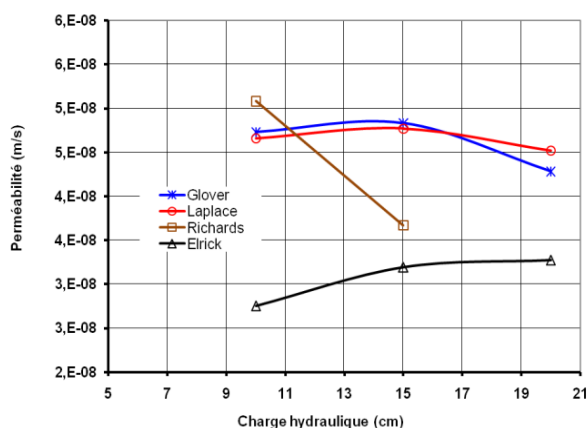


Figure 8 : Variation de ϕ_m en fonction de H .

Figure 8: Variation ϕ_m according to H .

4- Conclusion

L'étude de l'infiltration en place en utilisant l'infiltromètre à simple anneau ouvert aboutit aux conclusions décrites ci-dessous :

- L'analyse de Glover et celle de Laplace surestiment les valeurs de perméabilité surtout pour de faibles charges d'eau appliquées. L'analyse d'Elrick permet une meilleure évaluation de la conductivité et du potentiel d'écoulement matriciel du fait que les calculs se font pour chaque charge hydraulique appliquée et donc tiennent compte des hétérogénéités locales dans le puits. Cette méthode nécessite une bonne estimation du paramètre α^* qui doit se faire de préférence au laboratoire.
- L'analyse par la méthode des équations simultanées n'est valable que pour des milieux parfaitement homogènes. Ceci est lié au fait que le rapport entre les débits en régime permanent obtenus pour deux charges d'eau successives doit être compris dans un intervalle de valeurs bien précises.
- Les mesures sont longues à réaliser dans un sol argileux ce qui occasionne la création d'une couche mince de boue sur le sol en contact direct avec l'eau. Dans un matériau gonflant cette boue empêcherait l'infiltration : ceci limite l'utilisation de cet appareil dans des argiles gonflantes.

Références bibliographiques

- [1] Amraoui (N.). – Etude de l'infiltration dans les sols fins non saturés. Thèse de Doctorat. INPL, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy. (France). 325p. (1996).
- [2] Cazaux (D.). – Mesure et contrôle in-situ de la perméabilité des matériaux utilisés dans les dispositifs d'étanchéité pour la protection de l'environnement, état de l'art et développement. DEA Génie Civil. INSA Lyon. (1998).
- [3] Didier (G.), Norotte (V.), Bentoumi (O.), Alimi-Ichola (I.) et Cazaux (D.) – Protocole opératoire de mesure de la perméabilité en laboratoire - Cas des sols fins non saturés. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire Géotechnique, Mars 1996, 274p. (1996).



- [4] Gardner (W.R.) – Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. Soil Science Society of America, Vol. 20, pp.317-320. (1956).
- [5] Gardner (W.R.) – Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, Vol. 85, pp.228-232. (1958).
- [6] Glover, (R. E.). – Flow from a Test-Hole Located Above Groundwater Level. U.S. Bureau of Reclamation, Eng. Meng., 8:69–71, (1953).
- [7] Magnan (J.P.), Zadjiaoui (A.). – « Evaluation du coefficient de perméabilité du sol à partir de la connaissance de la profondeur du front d'humidification », Colloque National sur les propriétés de transfert dans les géomatériaux à l'Ecole Centrale de Lille - Villeneuve d'Ascq, France. 1 & 2 février 2006.
- [8] Philip, (J. R.). – Approximate Analysis of the Borehole Permeameter in Unsaturated Soil. Water Resources Research. 21(7):1025–1033, (1985).
- [9] Reynolds, (W.D.) and Elrick, (D. E.). – A Method for Simultaneous In-Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Sa Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship. Groundwater. Monitoring Review, Vol 6, No. 4, pp. 84. (1986).
- [10] Reynolds, (W. D.) and Elrick, (D. E.). – A Laboratory and Numerical Assessment of the Guelph Permeameter Method. Soil Science, 144: 282–299, (1987).
- [11] Richards (L.A.). – Capillary conduction of liquids through porous medium. Physic 1, pp.318-333. (1931).
- [12] Zadjiaoui (A.). – Étude du transfert hydrique dans les sols non saturés : Échange sol – atmosphère. Thèse de doctorat Es Sciences. Université de Tlemcen. (2009).
- [13] Villey (N.). – Interprétation des essais en place. Thèse de doctorat. ENPC Paris. Géologie de l'ingénieur. (2000).