

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.



MESURE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A L'AIDE DU PRESSIO-INFILTROMETRE

MEASURE OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY WITH THE PRESSIO-INFILTROMETER

M. Cheriat¹ G. Didier¹ J.J. Fry² Y. Lemoine³

¹I.N.S.A de Lyon, France

²E.D.F./C.N.E.H., Le Bourget du Lac, France

³C.P.G.F., Le Pecq, France

Résumé: En application des textes en vigueur en France, une barrière passive d'un site d'enfouissement technique de classe I doit présenter un coefficient de perméabilité inférieur à 1.E-09 m/s sur une épaisseur de 5 mètres.

Une analyse critique des différents appareillages existants portant principalement sur la précision des mesures des faibles débits et sur leur automatisation, nous a conduit à concevoir et réaliser un nouvel appareillage.

Le pressio-infiltromètre permet de mettre en pression le fluide d'essai (de 3 à 50 kPa), et présente en plus les avantages suivants: enregistrement précis et continu des volumes d'eau infiltrés dans le tube central et l'anneau de garde.

Après avoir décrit un essai de longue durée réalisé en laboratoire sur un sol gonflant (sable traité à la bentonite), nous donnons les résultats obtenus et les méthodes d'interprétation y compris par l'utilisation d'un modèle mathématique.

INTRODUCTION

La mesure de faibles perméabilités, (de l'ordre de 10^{-9} m/s), à l'aide des infiltromètres classiques à double anneau est particulièrement délicate dans la mesure où nous sommes obligés de considérer comme non négligeables: l'évaporation au niveau des anneaux, les variations de températures et les modifications du comportement des argiles lors de leur saturation (Day, S.R et al, 1985, Bouwer H, 1966). Ces paramètres interviennent de façon importante dans l'estimation du volume d'eau mesuré. Les infiltromètres (type Muntz) qui utilisent une faible charge d'eau nécessitent un dispositif très précis de mesure en continu du faible débit d'eau infiltré. Ces remarques nous ont conduits à concevoir et étudier un nouvel appareillage: le pressio-infiltromètre.

I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL:

La figure 1 présente le schéma du dispositif expérimental utilisé en laboratoire.

I.1.LA CUVE D'ESSAI

La cuve est constituée, d'un cylindre de diamètre 60 cm et de 35 cm de hauteur, soudé sur un fond plat carré. L'ensemble est placé sur le dispositif support qui est muni aux extrémités de deux tiges filetées où sera fixé un chevêtre qui servira de réaction d'appui à l'infiltromètre pendant l'essai.

I 2. LE PRESSIO-INFILTROMETRE

- L'INFILTROMETRE

L'infiltromètre est constitué de 2 tubes en acier inoxydable de 30 cm de hauteur maintenus coaxiaux par 6 entretoises.

Le tube central d'épaisseur 3 mm a un diamètre interne de 108 mm. Le tube externe de diamètre intérieur de 320 mm et d'épaisseur 4 mm permettra d'injecter le fluide autour du tube interne, afin de réduire au maximum l'effet de bord et de permettre un écoulement vertical sous le tube central.

Compte tenu des profondeurs possibles d'enfoncement la hauteur de l'infiltromètre a été fixée à 30 cm.

Un couvercle amovible permet de fermer la partie supérieure de l'infiltromètre.

Deux robinets à boisseaux sphériques assurent l'injection de fluide dans chaque tube et deux autres servent de purge.

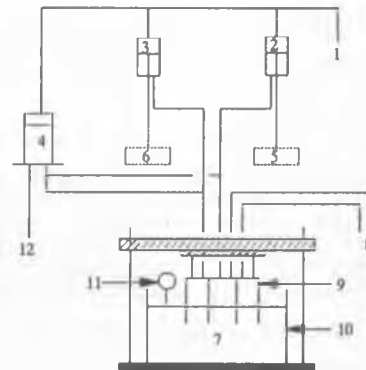


Figure 1 : Schéma de l'essai

- 1 - Azote, 2,3 - Réservoirs secondaires
- 4 - Réservoir d'alimentation,
- 5,6 - Afficheurs, 7 - Sol,
- 8,12 - Purges, 9 - Infiltromètre,
- 10 - Cuve, 11 - comparateurs

- LES RESERVOIRS SECONDAIRES

Le rôle des réservoirs secondaires (figure 2) est de mesurer en continu les débits d'injection dans le tube central et dans l'anneau de garde. L'eau contenue dans la cellule interne est mise sous pression régulée d'azote. La pression s'exerce également à l'extérieur de la cellule interne. Quelle que soit la pression utilisée nous n'avons donc aucune variation de section de cette cellule. Etant donné le diamètre des deux tubes et les débits attendus, pour un diamètre de la cellule externe de 14 cm, nous avons un diamètre de la cellule interne de 4 cm pour le réservoir secondaire relié au tube central et de 7 cm pour celui relié à l'anneau de garde. Un enregistreur permet de suivre en fonction du temps l'évolution du niveau d'eau, dans la cellule interne de chaque réservoir secondaire, par l'intermédiaire d'un capteur inductif de déplacement muni d'un flotteur.

La précision de la lecture obtenue avec le capteur est de 3.10^{-6} m.

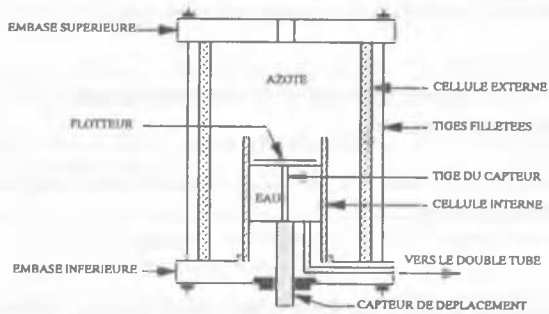


Figure 2 - Réservoir secondaire

II. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le sol est un sable traité à 15% de bentonite mis en place par couche de 5 cm sur 30 cm de hauteur, à une teneur en eau de 16%. L'infiltromètre est installé à une profondeur de 10 cm. Un tensiomètre enfoncé à 12 cm de profondeur et à 3 cm de l'anneau externe, permet de suivre l'évolution de l'état hydrique du sol à ce niveau. Les caractéristiques physiques initiales du sol sont les suivantes :

- densité sèche moyenne: 1,619
- teneur en eau : 16%
- teneur en eau volumique : 25,90%
- degré de saturation : 0,64

Deux séries d'essais ont été réalisées:

- La série I avec des paliers de pression de 15, 24, 29, 39 et 52 kPa. Chaque palier de pression est séparé du suivant par un palier de repos correspondant, d'une part à l'arrêt de l'infiltration (coupure de l'alimentation), et d'autre part au suivi de la dissipation de la pression imposée, jusqu'au point d'entrée d'air, par l'intermédiaire d'un capteur de pression relié au tube central et fixé sur le couvercle de l'infiltromètre.

- La série II a été conduite avec les paliers de pression de 15, 27, 39, et 52 kPa réalisés en cascade.

Pour tous les paliers, la partie rectiligne de la courbe d'infiltration est obtenue après une durée supérieure à 24 heures (série II) et 3 jours (série I). Les volumes d'eau infiltrés pour la série I (figure 3) sont à peu près deux fois plus importants que ceux de la série II (figure 4). Les vitesses d'infiltrations obtenues (tableau 1) pour l'anneau de garde sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour l'anneau central. Cela laisse supposer que le front d'infiltration n'a pas dépassé la base de l'infiltromètre.

Les relevés en fin d'essai du degré de saturation à diverses profondeurs et distances de l'axe du pressio-infiltromètre, montrent que la hauteur d'eau infiltrée reste inférieure à la profondeur d'enfoncement. Seuls les points situés dans l'axe et à une profondeur inférieure à 7 cm se trouvent à un degré de saturation élevé. Le rapport γ_d/γ_w mesuré en fin d'essai varie entre 1.52 et 1.57 de 0 à 13 cm de profondeur. Il s'est donc produit un gonflement du sol au cours de l'essai. Lors du démontage du dispositif, nous avons constaté un gonflement en surface de 5 cm.

Le tableau 2 donne les valeurs des coefficients de perméabilité mesurés sur des échantillons intacts retirés dans la cuve, à différentes profondeurs, sous l'anneau de garde et sous le tube central. Le coefficient de perméabilité diminue avec la profondeur. Les dix premiers centimètres ont une perméabilité voisine de 1.10^{-8} m/s, au delà nous retrouvons la perméabilité initiale du sol mesurée à volume constant.

TABEAU 1 : Vitesses d'infiltration

Série	pression (kPa)	Vitesse d'infiltration (m/s)	
		Anneau de garde	Tube central
I	15	1,66E-09	1,35E-09
	24	3,30E-09	2,04E-09
	29	2,85E-09	1,48E-09
	39	7,87E-09	2,70E-09
	52	7,51E-09	1,84E-09
II	15	1,80E-09	1,35E-09
	27	2,20E-09	1,37E-09
	39	3,16E-09	1,58E-09
	52	3,95E-09	2,17E-09

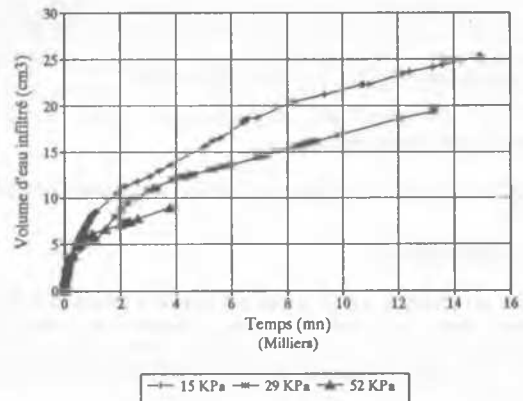


Figure 3 - Courbes d'infiltration pour la série I sous le tube central

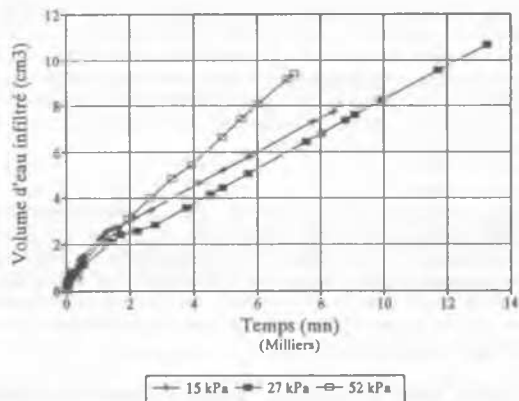


Figure 4 - Courbes d'infiltration pour la série II sous le tube central

TABLEAU 2: Mesure de la perméabilité en laboratoire.

Perméabilité sous le tube central

Profondeur	Wi	γ_d/γ_w	K (m/s)
7.5 cm	25.31	1.527	1.58E-08
12.5 cm	16.54	1.558	7.10E-10
17.5 cm	15.32	1.560	7.92E-10

Perméabilité sous l'anneau de garde

Profondeur	Wi	γ_d/γ_w	K (m/s)
12.5 cm	17.21	1.553	3.046E-08
17.5 cm	15.29	1.554	1.01E-09
22.5 cm	14.76	1.565	3.09E-10

III. INTERPRETATION DES ESSAIS

- EXTRAPOLATION LOGARITHMIQUE

Cette méthode consiste à tracer le logarithme de la vitesse d'infiltration en fonction de la charge imposée. On extrapole linéairement une valeur de flux pour une petite pression p_n . Cette valeur est appelée "flux spécifique" et est assimilée à la perméabilité. Nous choisirons comme valeur de p_n 3 KPa.

La figure 5 donnant la variation du logarithme de la vitesse d'infiltration en fonction de la pression imposée, montre que l'alignement des points est nettement plus marqué pour la série II que pour la série I.

La valeur du flux spécifique obtenue pour les deux série est voisine de 1.10^{-9} m/s.

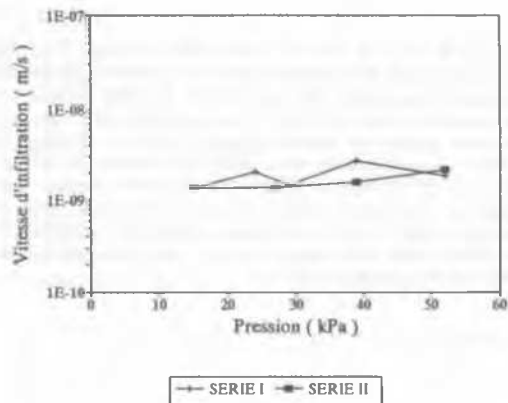


Figure 5: Extrapolation logarithmique.

MODELE DE PHILIP

Ce modèle est obtenu à partir de la solution analytique de l'équation d'infiltration de Philip (1957). Dans le cas d'une infiltration verticale, la solution de Philip en série entière de \sqrt{t} est considérée. Elle s'applique à des sols homogènes dont le profil d'humidité initial est uniforme et pour une charge constante appliquée en surface. Quand cette solution est limitée à ces deux premiers termes, elle s'écrit:

$$I = S\sqrt{t} + A t \quad (1)$$

S correspond à l'absorptivité et exprime la capacité plus ou moins grande que possède le sol à absorber l'eau par capillarité et I la lame d'eau infiltrée.

A représente un paramètre ayant les dimensions d'une vitesse, qui est de l'ordre de $K_s/3$ à $2K_s/3$, K_s étant la conductivité du sol à saturation.

Sur l'ensemble des paliers de pression, seuls les paliers de la série II s'ajustent à l'équation 1. Le paramètre S est sensiblement constant pour tous les paliers et est égal en moyenne à $4.5 \cdot 10^{-7}$ m/s. La variation du logarithme de A en fonction de la pression pour la série II est donnée sur la figure 6. Les points semblent s'aligner sur une droite. Une interpolation linéaire analogue à celle de l'interprétation logarithmique pour une pression de 3 kPa donne une valeur de A égale à $5.10 \cdot 10^{-10}$ m/s et une valeur de K_s égale à $1.5 \cdot 10^{-9}$ m/s voisine de celle obtenue précédemment.

- MODELE NUMERIQUE

Un modèle numérique intégrant l'équation de Richards a été utilisé pour simuler l'écoulement transitoire dans un sol non saturé. Les variables à prendre en compte sont: la perméabilité à saturation qui est le but du calcul, la courbe de rétention, la courbe de perméabilité relative fonction de la teneur en eau. Comme les pressions négatives ont été supérieures à la limite d'utilisation du tensiomètre, la caractérisation hydrodynamique est apparue compromise. Des corrélations (Fry, 1988) ont été employées pour décrire les courbes hydriques avec l'expression de Van Genuchten (1980). 4 sols ont été considérés, classés CL, CH, ML et MM dans la classification USCS (IP = 11 et 25) et 4 degrés de saturation ont été fixés: 56, 70, 90 et 95%. Les résultats montrent que pour une perméabilité à saturation de 1.10^{-9} m/s, objectif recherché, les volumes d'eau infiltrés varient de 1.8 à 21.4 cm³ après 2000 minutes

d'infiltrations et de 6 à 85 cm³ après 8000 minutes. Ces résultats montrent l'importance des caractéristiques non saturées. En prenant les caractéristiques d'une argile CH, les résultats de débit obtenus avec un degré de saturation initial de 55% et une perméabilité à saturation de $1 \cdot 10^{-9}$ m/s sont proches des mesures (figure 7). Mais le profil de teneur en eau montre une avancée du front calculé trop rapide. En prenant une perméabilité de 10^{-10} m/s et un gonflement du sol en pression positive, les résultats sont alors plus proches des mesures. Il apparaît alors capital de prendre en compte la loi de gonflement pour bien interpréter l'essai. Vauclin (1988) avait déjà montré que la non prise en compte du gonflement amenait une erreur de 1 à 3.

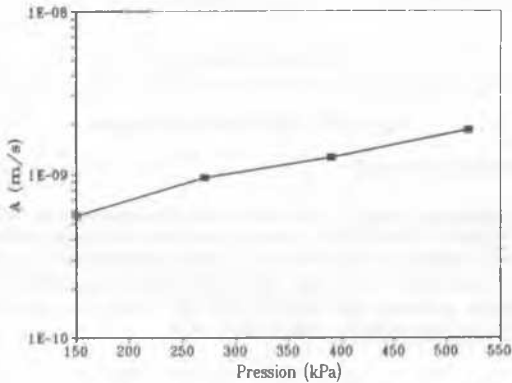


Figure 6: Paramètre A pour la série II

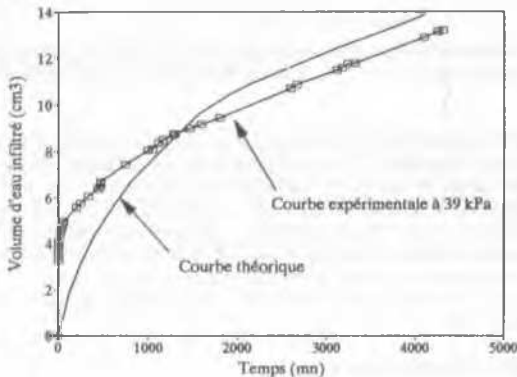


Figure 7: Courbe d'infiltration théorique et valeurs expérimentales

CONCLUSION

Pour chaque palier de pression imposée, nous observons que l'infiltration cumulée tend vers une asymptote linéaire. Lors des expérimentations, cette tendance est constatée sur une période de longue durée. Par conséquent, nous considérons que chaque densité de flux calculée à partir de la pente de la partie linéaire de la courbe d'infiltration est représentative d'un flux d'eau dans une zone saturée d'épaisseur définie mais variable. Cette remarque permet d'envisager deux cas de figure possibles selon la manière dont les essais sont conduits. Premièrement, si après un temps de repos, des conditions initiales de

teneurs en eau voisines s'établissent entre différents essais, les flux d'eau infiltrés lors de ces essais peuvent se propager à l'intérieur de fronts d'humidification semblables. Dans ce cas, l'état hydrique du sol étant comparable, la détermination de la perméabilité à partir de la densité de flux est raisonnable. Deuxièmement, dans le cas où les différents flux observés pour chaque palier de pression imposée sont représentatifs de différentes épaisseurs saturées, l'interprétation des essais sans connaître le potentiel hydrique du sol est erronée.

L'étude numérique nous a montré que la détermination des perméabilités demande, des temps d'essai longs et la prise en compte de la loi de gonflement. La détermination de la perméabilité à saturation est surestimée si le gonflement n'est pas pris en compte. Les enseignements tirés de l'étude nous conduisent à proposer un protocole permettant de réaliser un essai au pressio-infiltromètre, au sein d'une formation très peu perméable dans les meilleures conditions:

- le premier palier de pression, considéré comme une phase de saturation, doit être de longue durée de manière à réaliser dans le sol un front d'infiltration le plus grand possible;

- par la suite, les différents paliers de pression sont prolongés au-delà des premiers points de l'évolution linéaire afin de vérifier, la constance du phénomène;

- un palier de repos est imposé entre deux mises sous pression, de manière à reproduire des états hydriques du sol comparables entre chaque essai. Cette condition est impérative pour que l'interprétation des essais, à partir des vitesses d'infiltration soit probante;

- le nombre de paliers sera au minimum de cinq les valeurs extrêmes pouvant être de 8 et 50 kPa avec 15, 25 et 35 kPa comme valeurs intermédiaires;

- la profondeur du front d'infiltration pourra être estimée par une autopsie minutieuse en fin d'essai (profil de teneur en eau) ou par l'introduction d'un tensiomètre dans le tube central à une profondeur connue.

REFERENCES

- BOUWER H. (1966).** Unsaturated flow in groundwater hydraulics. Journal of the hydraulic division, proceedings of the American society of civil engineering. Vol 90, n°hy5, pp.121-143
- DAY S.R., DANIEL D.E. (1985).** Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. Journal of geotechnical engineering Vol.111, N°8, p.957-970.
- FRY J.J. (1988).** Etude du comportement polyphasique des sols. Rapport d'activité GRECO, p.253-269.
- PHILIP J.R. (1983).** The theory of infiltration: I. The infiltration equation and its solution. Sol. Sci, pp.345-357.
- VAN GENUCHTEN M.Th. (1980).** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil.Sci.Soc.Am. Journal 44 p.892-898.
- VAUCLIN M., ANGULO R. (1988).** Hydrodynamique des sols déformables partiellement saturés. Rapport d'activité GRECO p.218-226.