

Appareillage pour diagraphie de perméabilité Hydraulic profiling tool

Ph. Reiffsteck

Université Paris-Est, LCPC, Paris, France

B. Dorbani

CETE Est, MEEDDAT, Strasbourg, France

M. Khay & E. Haza-Rozier

CETE Normandie Centre, MEEDDAT, Rouen, France

RÉSUMÉ

Le Perméafor est un outil d'analyse en place des sols développé au début des années 80. Cet outil de sondage rapide donne une estimation de la perméabilité des couches traversées. Il permet l'élaboration de diagraphies continues de perméabilité dont l'analyse qualitative aboutit à un premier diagnostic de la structure des digues (repérages de niveaux de fuite essentiellement). Sa cadence d'auscultation est de l'ordre de 40 mètres linéaires par jour, ce qui en fait un appareil d'auscultation à « grand rendement », eu égard aux essais d'eau (type Lefranc) réalisés classiquement, qu'il complète avantageusement. La diagraphie de perméabilité obtenue est complétée par une courbe de fonçage (durée d'enfoncement pour 20cm) afin de juger qualitativement de la résistance à l'enfoncement du sol.

Cette communication présente la validation de l'appareil avec différents essais de perméabilité en laboratoire ou in situ et une campagne expérimentale menée sur site avec comparaison avec des essais de laboratoire, des essais Lefranc et des essais au pénétromètre statique.

ABSTRACT

The Perméafor is an in situ soil testing device developed in the early 80's. The tool is advanced through the subsurface at a constant rate while water is injected through a screen at the mid level of the probe. A quick estimate of the permeability profile of ground layers encountered can be derived. Then a reliable preliminary diagnosis of dikes structure can be drawn from the qualitative analysis of this profile (identification of strata with leakage). Its testing cadence is about 40 linear meters per day, which makes a "high-efficiency" testing device, in comparison with water tests classically made (Lefranc type), which it supplements advantageously. The permeability profile obtained is complemented by a penetration curve (elapsed time for 20 cm driving depth) in order to evaluate the quality of the penetration resistance of the soil.

This paper presents calibration of this test with water tests performed in laboratory and in situ and the use of this device during a dike survey campaign and comparison of this test with Lefranc tests and electric cone penetration testing.

Mots-clés : Essai de perméabilité, essai Lefranc, diagraphie de perméabilité, coefficient de perméabilité

Keywords : water test, Lefranc test, hydraulic profile, permeability coefficient

1 INTRODUCTION

Le Perméafor est un outil d'analyse en place des sols développé au laboratoire des Ponts et Chaussées de Strasbourg depuis le début des années 80. Cet outil de sondage rapide permet une estimation de la perméabilité des couches traversées. Il permet d'avoir un ordre de grandeur de la perméabilité du sol de manière quasi-continue (environ tous les 20 cm). La diagraphie de perméabilité obtenue est complétée par une courbe de fonçage (durée d'enfoncement pour 20 cm) afin de juger qualitativement de la résistance à l'enfoncement du sol et de repérer les hétérogénéités du massif. Il s'est révélé être un outil adapté à l'optimisation de la caractérisation géomécanique des infrastructures fluviales.

Ce papier présente le dispositif développé, la méthode d'essai et d'analyse des résultats, la compilation des résultats qui a permis d'aboutir à une corrélation avec la perméabilité classiquement mesurée ainsi que quelques applications type de l'appareillage.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1 Principe de l'essai

Il s'agit de mesurer le débit injecté au travers d'une pointe crépine, sous une charge constante, à la profondeur du forage. La géométrie spécialement étudiée de la pointe permet de réaliser les essais à l'avancement, en continu et sans l'utilisation d'obturateurs (Ursat, 1992).

2.2 Matériel

Le matériel en plus de la sondeuse géotechnique et des organes tels que tubes de forage, tête d'adaptation et flexibles, est constitué par (figure 1) :

- une pointe crépine Perméafor à la géométrie spécifique,
- un module de mesure avec débitmètres, capteurs de pression et de déplacement et vannes de dérivation,
- un boîtier électronique de conditionnement pour acquisition sur un ordinateur portable équipé d'un logiciel de visualisation donnant le débit instantané et le débit moyen en temps réel.

Les deux débitmètres permettent de couvrir une plage allant de 0,1 à 180 l/mn avec une précision de +/- 0,5 %. L'ensemble fonctionne avec un groupe de pression régulé par l'intermédiaire d'une balance hydrostatique permettant d'appliquer des charges hydrauliques comprises entre 3 et 5 m avec une précision de +/- 5 mm. La pression H_e est mesurée au niveau de la pompe.

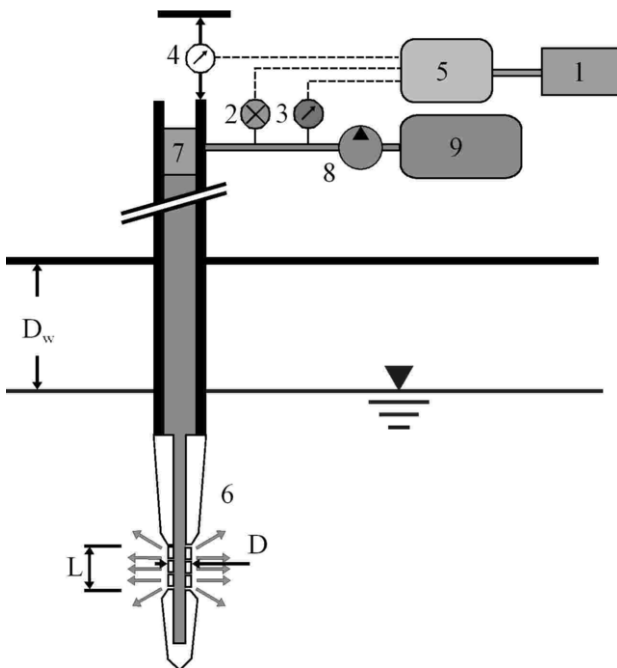


Figure 1. Principe de l'essai Perméafor (1 : ordinateur portable ; 2 : débitmètre ; 3 : capteur de pression ; 4 : capteur de déplacement ; 5 : centrale d'acquisition ; 6 : pointe Perméafor ; 7 : bloc en T avec presses étoupes ; 8 : pompe ; 9 : réservoir)

Le dessin spécialement étudié de la pointe crépine Perméafor permet d'assurer l'étanchéité autour de la crépine. Ainsi la direction d'écoulement est bien définie. Elle est horizontale à mi-hauteur de la crépine.

Les autres avantages de l'essai Perméafor sont de permettre de réaliser un essai au cours du fonçage sans tubage préalable et, du fait de la faible hauteur de la cavité cylindrique, d'effectuer un grand nombre de mesures (5 par mètre ou plus) (Ursat, 1995).

3 METHODE D'ESSAI

3.1 Protocole expérimental

Durant l'essai au Perméafor, la pointe crépine est foncée dans le sol par pas de 20 cm grâce à une sondeuse géotechnique hydraulique classique avec marteau. Lorsque la crépine est dans le sol, l'injection démarre et se fait de manière continue pendant toute la durée du fonçage. A l'arrêt du fonçage, le débit est enregistré en fonction du temps pendant 10 s puis le fonçage reprend.

3.2 Facteurs d'influence

Le débit injecté est fonction de la perméabilité du sol et de la charge effectivement appliquée. Cette dernière dépend de la charge disponible en surface, de la profondeur de la nappe phréatique et des pertes de charge dans le circuit d'injection (débitmètre, vannes, tuyauteries, crépine). Les pertes de charges sont fonction du débit et elles sont mesurées par un étalonnage préalable. Cet essai nécessite donc une correction que nous allons détailler dans cette communication.

3.3 Analyse des résultats

Le paramètre dérivé des mesures et assimilable à une perméabilité est :

$$P_k = \frac{Q}{H'}$$

avec :

Q : débit d'eau absorbé par le sol,

H' : charge effective

$$H' = H_e + D_w - dH(Q)$$

où :

H_e : charge appliquée par le dispositif,

D_w : profondeur de la nappe,

$dH(Q)$: pertes de charges dans le circuit, fonction du débit,

Un calcul d'erreur mené avec les valeurs données précédemment mène aux conclusions suivantes : l'erreur sur P_k lors d'un essai à charge constante est de l'ordre de 3% et peut devenir plus importante si la charge effective devient trop faible, ce qui peut se produire pour les sols très perméables car lorsque le débit augmente, les pertes de charge dans le circuit d'injection augmentent, pour les nappes peu profondes ou D_w est proche de 0 ou les nappes captives pour lesquelles $D_w < 0$.

De ce fait le rapport Q/H' est généralement plafonné à une valeur de $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, correspondant à des sols très perméables.

Le temps bref de l'essai ne permet pas d'obtenir un écoulement permanent. De ce fait, le rapport Q/H' n'est pas calculé pour une valeur inférieure à 5.10^{-7} .

3.4 Corrélation avec la perméabilité

La littérature indique comme expression du débit :

$$Q = \frac{2\pi \cdot L/D}{\ln\left(\frac{L/D}{\sqrt{L^2/D^2 + 1}}\right)} \cdot K \cdot H' \cdot D$$

La formule permettrait, théoriquement de quantifier la perméabilité K en m/s des horizons traversés à partir du rapport Q/H' .

$$K = \alpha \cdot P_k$$

avec une valeur de $\alpha = 2,8$ pour $L/D = 1$ et $D = 0,05 \text{ m}$ (voir figure 1).

La figure 2 donne la corrélation obtenue à partir d'essais Lefranc ou d'essais de perméabilité réalisés en laboratoire sur moules Proctor pour plus d'une dizaine de sites ayant fait l'objet d'études détaillées. Ils ont été complétés par un étalonnage de l'appareil dans une cuve d'essai sur différents matériaux aux paramètres géomécaniques connus. Ces nombreux résultats ont permis de définir une valeur expérimentale de ce coefficient proche de 2,3.

Il semble réaliste d'utiliser cette relation dans une plage de mesure de Q/H' comprise entre 1.10^{-6} et $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ sous réserve bien sûr d'écarter les mesures situées aux interfaces de couches très différentes et d'avoir pris soin de repérer les niveaux piézométriques des nappes captives éventuelles.

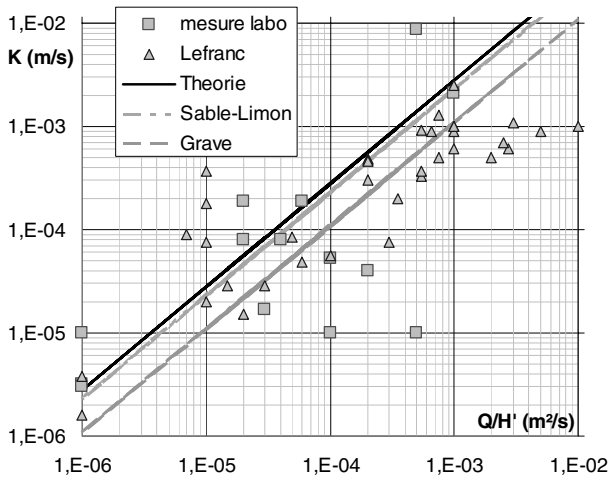


Figure 2. Corrélation entre les mesures du coefficient de perméabilité K par différentes méthodes et la grandeur Q/H'

4 CAMPAGNE D'ESSAIS SUR LES DIGUES DU RHIN

Une campagne d'essai a été réalisée sur les digues du Rhin dont la maîtrise d'ouvrage est assurée par EDF. Dans ce secteur, la digue rive gauche, et plus ponctuellement la digue rive droite, sont sujettes à des percolations actives depuis plusieurs années. Celles-ci arrivent au niveau de la berge rive droite du contre canal, en pied de talus aval. Dans les deux cas, la digue est à noyau en terre argileuse compactée, surmontée d'une recharge sablo-graveleuse en alluvions du Rhin. Le talus amont est revêtu d'une protection mécanique en enrochements (figure 3).

Le but de cette campagne était de diagnostiquer l'état du patrimoine « digue ». EDF avait prévu en première phase de définir des tronçons homogènes par méthodes géophysiques (panneaux électriques, radar et thermométrie GTC) et en deuxième phase de caractériser ces tronçons par identification et mesure de résistance et de perméabilité. A cette fin, trois essais ont été réalisés à un mètre de distance : le Perméafor, le CPT et un sondage carotté.

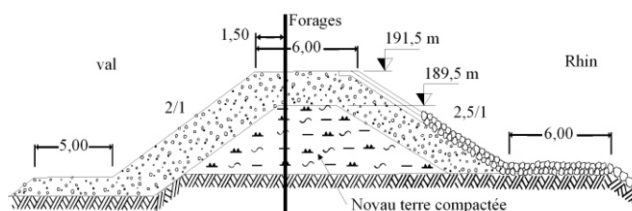


Figure 3. Profil type rive gauche de la digue

Outre des essais au Perméafor, des essais au pénétromètre statique avec mesure de pression interstitielle (CEN, 2005), des essais Lefranc et des carottages suivis d'essais en laboratoire (granulométrie, sédimentométrie, essai de perméabilité sur moule CBR) ont été réalisés lors de cette campagne. Des piézomètres ont également été posés. L'ensemble de ces essais et de ces prélèvements a été réalisé dans un rayon de 2 m autour de chaque point de sondage Perméafor afin de minimiser les écarts dus à une possible hétérogénéité de ce milieu anthropique.

L'ensemble des informations collectées a permis d'obtenir un jeu de paramètres qui a pu être comparé aux résultats du Perméafor. Les résultats obtenus présentent une bonne corrélation avec les essais de pénétration statique, les zones de faiblesse mécanique apparaissent bien sur la courbe de fonçage Perméafor (figures 4 et 5).

Ainsi le sol sablo-graveleux de la recharge, le noyau en terre compactée classé comme des limons gris et les graves grises du Rhin sont clairement identifiées grâce aux contrastes de perméabilité constatés à une profondeur d'environ 2 m et 6 m. Les analyses des carottages ont permis de s'assurer de la pertinence de l'essai Perméafor dans la localisation de ces zones de contact.

Il a de ce fait permis de localiser les zones susceptibles du fait du fort contraste de perméabilité d'être sujettes à l'entraînement de la fraction fine par les écoulements et donc être le siège de phénomènes d'érosion interne.

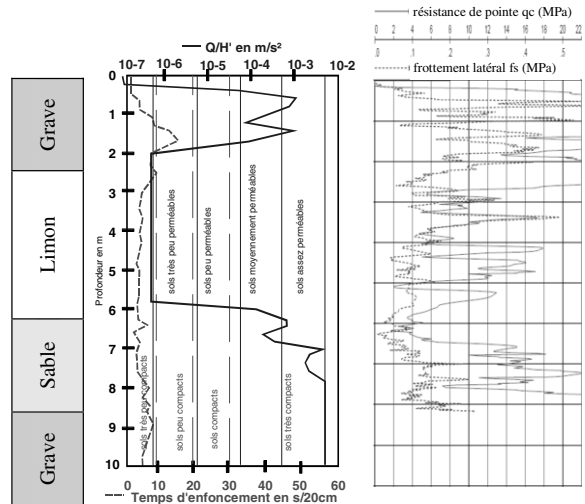


Figure 4. Diagraphie de rapport Q/H' et pénétrogramme, profil 5

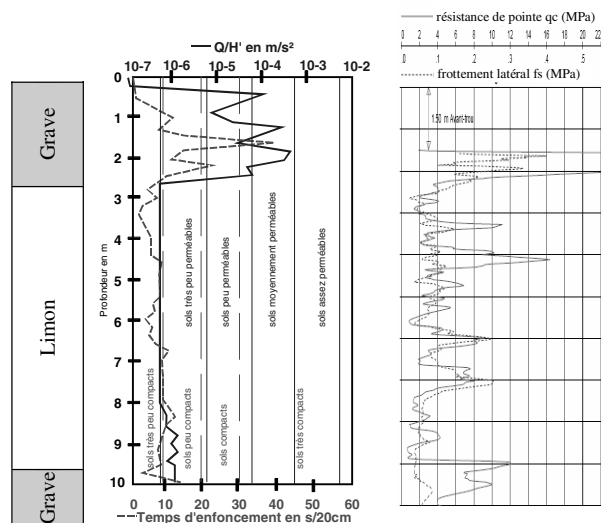


Figure 5. Diagraphie de rapport Q/H' et pénétrogramme, profil 6

La figure 6 illustre l'analyse qualitative de la nature du matériau réalisée avec le diagramme proposé par Robertson (1990) à partir de la résistance de pointe q_c et du rapport de frottement (rapport cisaillement sur manchon sur résistance à la pointe). Cette analyse permet de discrétiser assez précisément la classification des matériaux traversés. On retrouve les matériaux identifiés lors de l'ouverture des carottes prélevées à proximité (2 m dans l'axe de la digue) (ISO, 2002 et 2003).

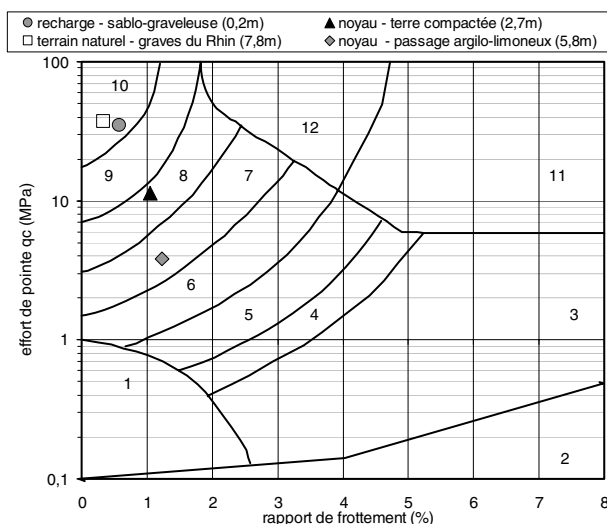


Figure 6. Classifications de Robertson (1990) pour l'essai sur le profil 56 (1 : sol fin argile ou silt sensible, 2 : sols organiques et tourbes, 3 : argile, 4 : argile silteuse à argile, 5 : silt argileux à argile silteuse, 6 : silt sableux à silt argileux, 7 : sable silteux à silt sableux, 8 : sable silteux à sable, 9 : sable, 10 : sable graveleux à sable, 11 : sols fins intermédiaires très raides, 12 : sable cimentés ou dilatants)

Tableau 1. Résultats des essais digue du Rhin secteur de Colmar

Forage	Prof (m)	Class.	k (m/s)			Perméafor Q/H' (m ² /s)
			Hazen	Labo	Lefranc	
01	0,75	Sg	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$		$5,0 \cdot 10^{-4}$
	1,25	Sg	$4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$		$1,0 \cdot 10^{-4}$
06	1	Gs	$9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
07	1	Gs	$9 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$		$1,0 \cdot 10^{-4}$
08	6	SI	$1 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-6}$
	0,75	Gs	$9 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$		$1,0 \cdot 10^{-5}$

Le tableau 1 récapitule les valeurs déduites des différents essais de perméabilité réalisés sur le site.

Les comparaisons avec ces techniques ont donc permis de s'assurer que le Perméafor était capable de réaliser une reconnaissance des transitions, aussi bien hydraulique que mécanique, du milieu traversé.

4 EVOLUTIONS

Comme cela a été mis en valeur dans ce papier, il serait intéressant pour faciliter le diagnostic basé sur l'analyse des essais au Perméafor d'intégrer une mesure de type pointe électrique afin de pouvoir classer les sols par les abaques de type Robertson, d'en déduire une estimation de l'état de densité et de pouvoir identifier les zones de faible saturation. Il serait alors possible de proposer des corrélations plus robustes car validées par plusieurs informations sur le comportement mécanique et hydraulique des matériaux testés. Ces évolutions nécessitent entre autres :

- des modifications de l'appareillage ;
- une adaptation de la méthodologie d'auscultation des structures internes des ouvrages formalisée par la rédaction conséquente d'un guide méthodologique.

Il semble important d'intégrer un certain nombre de :

- vérification et automatisation de l'étalonnage des pertes de charge du flexible
- différenciation de la corrélation en zone non saturée de la zone saturée
- enregistrement et analyse des paramètres de forage de la sondeuse utilisée,

Il est donc envisagé d'ajouter un capteur de pression d'eau au niveau de la pointe, d'adapter une pointe de pénétromètre statique en tête et de renouveler totalement le système d'acquisition afin d'améliorer les résultats acquis par le dispositif.

5 CONCLUSIONS

Le Perméafor est un appareil développé et utilisé par le Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Environnement de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire. Il permet l'élaboration de diagraphies continues de perméabilité dont l'analyse qualitative aboutit à un premier diagnostic de la structure des digues (repérages de niveaux de fuite essentiellement). Cet appareil détermine de manière fiable les zones de transition à fort gradient (i.e. contact limons, graves par exemple), qui sont des zones préférentielle pour le développement d'une érosion interne de contact. Sa cadence d'auscultation en fait un appareil d'auscultation à « grand rendement », eu égard au nombre d'essais d'eau réalisés classiquement qu'il complète avantageusement.

Dans le domaine des digues et canaux, le nombre d'ouvrages existants est considérable, qu'ils relèvent de Voies Navigables de France, d'Électricité de France, de collectivités locales ou de maîtrises d'ouvrage privées. Les forts enjeux liés à la pérennité de ces ouvrages existants, notamment vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne, ont amené le LRPC de Strasbourg à envisager l'évolution d'une part de son matériel Perméafor afin d'obtenir des paramètres géomécaniques quantitatifs, et d'autre part de la méthodologie d'auscultation des structures internes des ouvrages.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier le ministère de l'Environnement de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire pour le financement de cette action de recherche ainsi que leurs collègues P. Ursat, P. Chassaing.

Ils remercient également Électricité de France pour sa collaboration, sa contribution financière à la réalisation des essais et l'accès aux données du projet.

REFERENCES

- CEN (2005) EN/ISO 22476-1 Essais électriques de pénétration au cône et au piézocône, 41 pages.
- CEN (2006) EN 1997-2 Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais. 221 pages.
- ISO (2002) ISO 14688-1, Dénomination et description des sols, 16 pages.
- ISO (2003) ISO 14688-2 Quantification des caractéristiques descriptives et principes de classification, 18 pages.
- Robertson, P. K., (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151 - 158.
- Ursat P., (1992). Le Perméafor. Appareillage de diagraphie de perméabilité. Bulletin de liaison P et Ch, 178, pp.19-26.
- Ursat P. (1995). Le Perméafor, un appareil bien adapté à l'analyse des fuites dans les digues en terre, 2nd European conference on soil mechanics and foundation engineering, 11, Copenhagen vol. 1, pp. 1297-1301.