

Le Perméafor, un outil de diagnostic des ouvrages hydrauliques en terre et de leur fondation

The Perméafor, an assessment tool for earthen hydraulic structures and their foundation

Yannick, Fargier

CETE Normandie Centre, ERA « Dignes et Ouvrages Fluviaux », 11 rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois
yannick.fargier@developpement-durable.gouv.fr

Edouard, Durand,

CETE Normandie Centre, PCI « COHMF », 11 rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois Cedex
edouard.durand@developpement-durable.gouv.fr

Romain, Rousselet

EDF-DPIH-CIH, 20 rue du Pâturage, BP 2314, 68069 Mulhouse Cedex,
romain.rousselet@edf.fr

MOTS CLÉS

Digues, Barrages, Auscultation, Géotechnique, Essais d'eau, Perméabilité, Compacité

RÉSUMÉ

Dans le cadre des études préalables aux dimensionnements d'ouvrages hydrauliques en terre de type barrage (y compris les digues de canaux) ou digues de lutte contre les inondations, la connaissance des caractéristiques d'écoulements hydrauliques internes aux sols de fondation est une nécessité. Il en est de même pour les diagnostics d'ouvrages existants pour lesquels la présence d'écoulements internes peut être à l'origine de désordres importants conduisant parfois à la ruine de l'ouvrage. Dans la gamme des essais dont disposent les géotechniciens pour le diagnostic des ouvrages, les essais de perméabilités de type Lefranc ou Nasberg sont souvent utilisés mais ils ne donnent pas les variations fines de perméabilité des sols avec la profondeur. Un outil permet pourtant la réalisation d'une diagraphie de perméabilité sans avoir recours à un préforage, il s'agit du Perméafor. Cet outil, permet sous une charge constante de mesurer le débit injecté dans le sol au travers d'une pointe crépine 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. Des recherches antérieures ont permis de proposer une relation entre la mesure et la perméabilité du milieu et de montrer que le Perméafor était un outil adapté pour la détection des fuites dans les digues en terre tout en renseignant la compacité des horizons rencontrés. Depuis, de nouvelles évolutions en cours de développement permettront d'améliorer la mesure de la perméabilité et de caractériser son anisotropie.

ABSTRACT

In the design processes for construction of earthen hydraulic structures (like dams) or structures against floods (like dikes and levees), the knowledge of the internal characteristics of hydraulic flows on the grounds and foundation is a necessity. It's also the case for diagnoses of existing hydraulic structures for which the presence of internal flows can be at the origin of important deteriorations leading sometimes to the breach of the structure. In the range of the different in-situ permeameter tools used for the diagnosis of the structures, the Lefranc (or Nasberg) permeameter test is often used even if he does not give the variations of permeability with the depth (with a high resolution). A tool, the Permeafor, allows a quasi-continuous logging of permeability without drilling. Its principle consists measuring the water flow injected in the ground through a screened casing, under a constant hydraulic head, at the depth of the drilling. The geometry specially studied of the tip allows to perform the water test without the use of packers. Previous researches have allowed to propose a relation between the measurement and the true permeability of the ground and to show that the Perméafor test was a tool adapted to the detection of the leaks in earthen dams. Actually new evolutions of the device and the information processing are under development to improve the measure of the permeability as well as the characterization of its anisotropy.

1. INTRODUCTION

L'eau joue un rôle prépondérant dans les problématiques d'intégration d'infrastructures du génie civil dans leur environnement [2]. De manière plus précise, la connaissance des caractéristiques d'écoulements internes des sols est nécessaire pour :

- les études préalables au dimensionnement d'ouvrages hydrauliques en terre de type barrage ou digue de lutte contre les inondations [2 ;12];
- le diagnostic d'ouvrages existants [2 ;13].

En effet, lors d'un dimensionnement inadéquat et/ou lors d'un diagnostic de vieillissement trop tardif, la présence d'écoulements internes peut être à l'origine de phénomènes d'érosion conduisant parfois à la ruine de l'ouvrage [6]. Ainsi, l'érosion interne représente une des causes principales de par le monde de rupture d'ouvrages avec la surverse et la rupture d'ensemble [7].

L'érosion interne est un phénomène complexe intervenant lorsque l'énergie liée à un écoulement interne permet d'arracher les particules les plus fines du squelette granulaire composant le corps de digue et/ou sa fondation [6]. Or le paramètre du sol déterminant cette vitesse d'écoulement est la perméabilité. En conséquence, les gestionnaires d'ouvrage sont à la recherche de méthodes robustes de caractérisation et d'auscultation permettant la détection d'évènements précurseurs au phénomène d'érosion interne [6].

En termes d'auscultation, les méthodes géotechniques et géophysiques sont généralement employées de concert afin d'améliorer le positionnement des sondages et afin de valider la détection d'anomalies [5]. Parmi les méthodes destructives de type « essais d'eau », une méthode non conventionnelle, le Perméafor [12;13], considérée comme pertinente et complémentaire pour le diagnostic des ouvrages et la détection de fuites est ici présentée et discutée.

L'article propose dans un premier temps de décrire l'outil Perméafor ainsi que son périmètre d'intervention vis-à-vis des principales techniques de mesure de la perméabilité in-situ. Pour cela, deux études portant sur des cas récents de diagnostics de digue sèche et de digue à noyau en charge permanente sont présentées. Dans un second temps, une synthèse des recherches antérieures et actuelles sont détaillées suivie des développements en cours et futurs (pointe à double injection et nouveau module Perméafor). Enfin, une discussion sur les limites d'utilisation actuelles est présentée complétée de perspectives de développement.

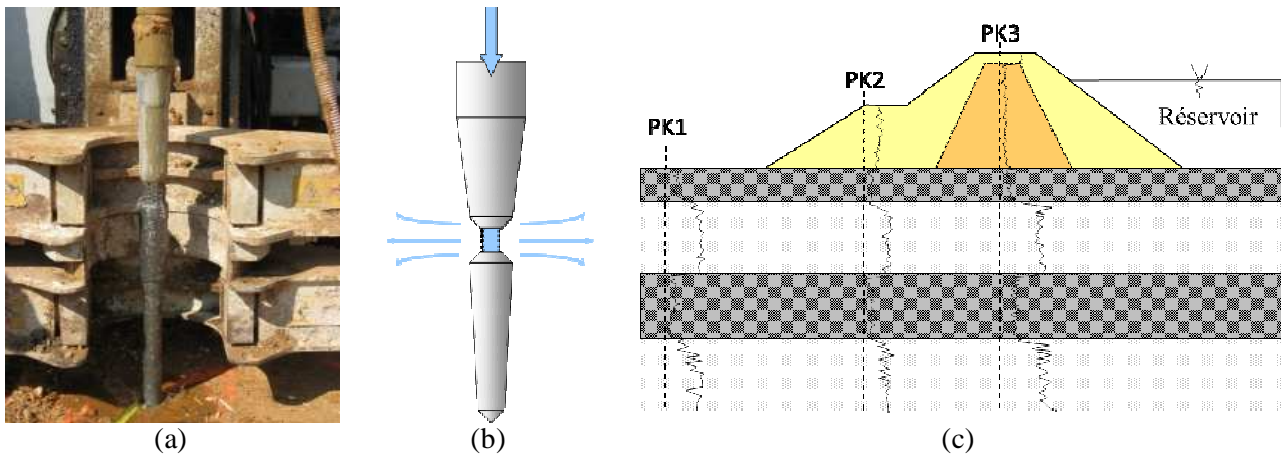
2. LE PERMEAFOR, ESSAI DE DIAGRAPHIE DE PERMEABILITE IN-SITU

2.1 Présentation

L'essai « Perméafor » [graphique 1(a) et 1(b)] est un outil de sondage et d'analyse en place développé dans les années 80 par Paul Ursat (LRPC Strasbourg) [12]. L'objectif de ce sondage est de renseigner avec un outil simple, robuste et de manière qualitative, le comportement hydraulique d'un sol. Le résultat attendu est un « log » quasi-continu d'une estimation de la perméabilité des sols en place permettant entre autre une analyse de la structure des digues et un diagnostic de repérage de fuites [graphique 1(c)].

2.2 Description de l'essai et résultats

L'essai complet consiste à battre la pointe Perméafor à l'aide d'une sondeuse géotechnique hydraulique classique équipée d'un marteau hydraulique et de réaliser un essai d'eau à différentes profondeurs [Graphique 1(a) et 1(b)]. Pour cela, une charge « H » est appliquée en continu par le biais d'un système hydraulique (module Perméafor) lors du battage. Selon le terrain et l'objectif de l'étude, tous les 20 cm en profondeur, un essai d'eau est réalisé en imposant une charge hydraulique constante « H' » au niveau de la crépine sur une durée choisie par l'opérateur (supérieure à 5 secondes).



Graphique 5 : (a) Photographie de la pointe Perméafor lors de la phase préparatoire de l'essai, (b) schéma de principe de la pointe Perméafor et (c) résultats schématiques attendus de trois sondages Perméafor pour le diagnostic d'une digue en charge à noyau étanche (modifié d'après Ursat [13]).

D'un point de vue pratique dans le système développé par Ursat [1995], la charge hydraulique (en amont du système hydraulique) est imposée par le biais d'une pompe asservie par des poids posés sur une balance hydrostatique. Il doit être noté qu'avec ce système, une calibration est réalisée au préalable pour s'affranchir des pertes de charges du système hydraulique.

Enfin, pour chaque essai d'eau, le débit injecté « Q » est mesuré par un débitmètre sur la durée d'injection de chaque essai. Le résultat présente ainsi à chaque profondeur le rapport entre la charge hydraulique imposée « H » au niveau de la crépine et le débit injecté « Q », soit $f(z) = Q/H$ [m^2/s]. En parallèle est également présentée une courbe de fonçage (temps nécessaire pour descendre la pointe de 20 cm) permettant ainsi de renseigner qualitativement la compacité des terrains traversés.

2.3 Positionnement de la méthode Perméafor

Les « essais d'eau », même s'ils visent à renseigner globalement un paramètre commun (la perméabilité), ne sont pas utilisés en pratique sous les mêmes conditions et objectifs. A cet effet, une synthèse des principales caractéristiques d'essais d'eau est présentée clairement dans la norme européenne sur les essais géohydrauliques permettant d'afficher les différents « périmètres » d'action de ces méthodes.

En théorie, l'essai Perméafor pourrait s'apparenter à un essai Lefranc pour lequel les débits sont rapportés à la charge hydraulique le tout multiplié par un coefficient de forme « m » [m^{-1}]. Ce coefficient de forme est dépendant de la forme de la lanterne, du milieu sondé et de la position de la lanterne dans ce milieu [1]. Les essais d'eau conventionnels se différencient toutefois du Perméafor selon plusieurs traits.

En effet, l'objectif premier de l'essai n'est pas d'offrir, actuellement, un essai précis de la perméabilité. Il doit pour cela intervenir en complémentarité d'autres essais d'eau dits plus « quantitatifs ». Ce caractère moins quantitatif du Perméafor est à mettre en balance avec l'objectif de très forte résolution verticale (notion de diagraphie de perméabilité) et la capacité d'obtenir en direct le log de perméabilité sur le terrain.

Cette forte résolution verticale est à rapprocher à la notion de volume d'investigation (nommé rayon d'influence dans la norme européenne). En effet, dans le cadre de l'essai Perméafor, la perméabilité mesurée est représentative d'un volume assez restreint proche de la crépine. Ce volume d'investigation est fonction de la taille de la crépine (environ 5 cm), de la durée de l'essai et du milieu sondé. Ainsi il peut être considéré que le rayon d'influence est centimétrique à décimétrique permettant à la fois de limiter la durée de l'essai et d'augmenter la résolution verticale. En conséquence, cet essai n'a pas pour objectif de caractériser une perméabilité « en grand » à la différence des essais de type pompage (rayon d'influence métrique à décamétrique) ou Lefranc (rayon d'influence décimétrique à métrique) [1].

D'un point vu matériel, l'essai doit être pratique, rapide et robuste et ne doit pas être dépendant de l'opérateur. Ces exigences sont atteintes par l'essai Perméafor grâce à la conception particulière de la pointe. En effet, les essais conventionnels nécessitent pour la plupart l'utilisation d'obturateurs dans un forage

préexistant. La pointe conique du Perméafor [brevet N°15 900] permet d'optimiser le serrage du sol autour du tubage et permet ainsi d'optimiser l'étanchéité et donc de s'affranchir des contraintes précédentes.

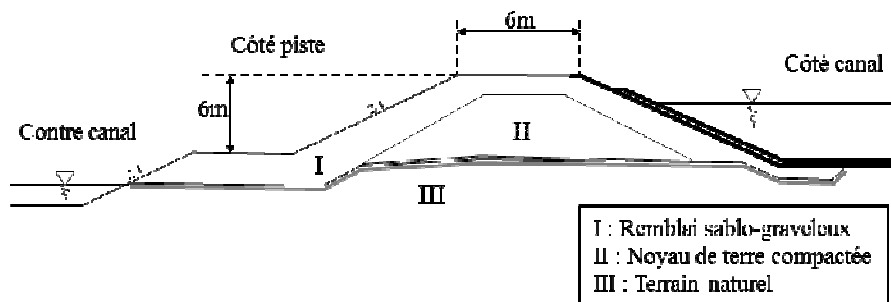
Le domaine de validité de l'essai Perméafor en termes de gamme de perméabilité limite son action pour l'étude des sols dont la perméabilité est comprise entre 10^{-3} et 10^{-7} m.s⁻¹. Enfin et en conclusion des caractéristiques précitées, cette technique peut être considérée à « grand rendement » eut égard aux techniques conventionnelles car plus de 40 mètres linéaires peuvent être réalisés par jour (dans les sols meubles peu compactes).

2.4 Cas d'étude

Cette section vise à présenter deux cas d'étude pour lequel l'essai Perméafor a permis de montrer une plus-value certaine. Pour chaque cas, l'ouvrage, l'objectif de l'étude et les résultats sont présentés, puis comparés avec d'autres méthodes plus « conventionnelles ».

2.4.1 Digue en charge permanente

L'étude est portée sur un ouvrage hydraulique de type barrage en terre [11] comprenant un noyau central assurant l'étanchéité [graphique 2]. Cet ouvrage permet la canalisation d'un réservoir d'eau pour une centrale hydro-électrique. Les objectifs de l'étude sont de pouvoir fournir les variations de perméabilité dans le corps de digue et en profondeur pour le dimensionnement d'un écran étanche (profondeur de l'écran à atteindre) et de caractériser les compacités des matériaux traversés afin de définir des modèles géotechniques de l'ouvrage dans le cadre de modélisations.



Graphique 6 : Coupe schématique de l'ouvrage étudié

Dans le cadre de cette étude géotechnique complète le Laboratoire Régional de Blois est intervenu ponctuellement pour mettre en place l'essai Perméafor (8 essais complets de 20 ml sont réalisés). Le graphique 3 illustre deux résultats de cette étude. La totalité des sondages réalisés sur le site (au centre de la crête de l'ouvrage) ont permis de mettre en évidence la succession de couche suivante :

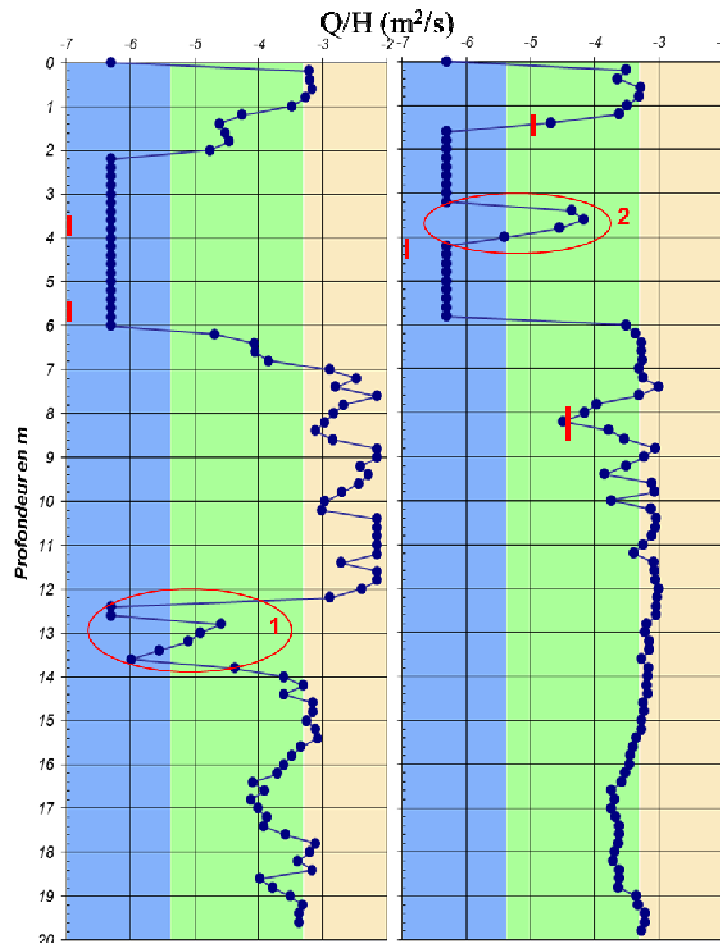
- une couche supérieure de 1 à 2 m d'épaisseur de perméabilité moyenne à forte ($10^{-4} < Q/H < 5.10^{-3}$ m².s) (notée « I » dans Graphique 2);
- une couche intermédiaire interprétée comme le noyau de la digue avec une perméabilité très faible ($10^{-6.3}$ m²/s, notée « II » dans Graphique 2). Cette couche présente localement des passages plus perméables dans quatre des huit sondages réalisés (Graphique 3(b) cercle 2) ;
- une couche inférieure correspondant aux alluvions locales ($10^{-4} < Q/H < 10^{-2}$ m².s, notée III dans Graphique 2) composée de graves. Cette couche renferme des lentilles localement plus imperméables (Graphique 3(a) Cercle 1).

Le Tableau 1 présente les résultats de mesures de la perméabilité en laboratoire réalisés à partir d'échantillons prélevés dans des sondages carottés. Les prélèvements ne coïncidant pas spatialement (ni du point de vue la méthode) avec l'essai Perméafor, les résultats doivent être comparés qualitativement. Cependant, ces résultats même s'ils diffèrent en valeur absolue sont globalement en adéquation avec l'analyse du Perméafor. De plus, un des huit essais réalisés laisse apparaître une couche plus imperméable pouvant s'avérer être une position éclairée pour la base de l'écran étanche. La mise en évidence de passages « moins perméables » dans les alluvions sous-jacentes permettait d'envisager un arrêt du rideau étanche dans ce niveau. Ce niveau n'ayant pas été identifié dans les autres sondages, cette option n'a pas été

retenue. Enfin, quatre des huit essais ont révélés des discontinuités potentielles de perméabilité dans le noyau étanche [Graphique 3(b)] pouvant expliquer les fuites observées et être à l'origine de phénomènes d'érosion interne.

Tableau 1 : Synthèse des résultats de perméabilité en laboratoire

Profondeur [m]	[1.5-1.8]	[3.4-3.9]	[4.1-4.4]	[5.5-5.7]	[8.0-8.9]
Nature du sol	Grave – Sableuse	Limon – Sableux	Limon peu graveleux	Limon	Grave – sableuse
Perméabilité moyenne k (m/s)	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$



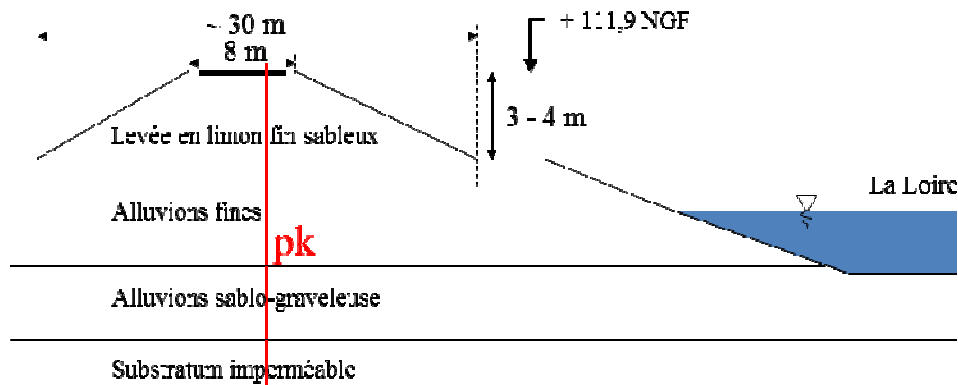
Graphique 7 : Résultat de deux essais Perméafor à 20 mètres. Les traits rouges représentent la position des essais de perméabilité réalisés en laboratoire avec la perméabilité mesurée [log (m/s)]. Le cercle rouge 1 illustre la position d'une couche plus imperméable entre 12 et 14 mètres de profondeur. Le cercle rouge 2 souligne la présence potentielle d'une anomalie de perméabilité dans le noyau étanche de l'ouvrage (anomalie repérée sur quatre des huit sondages réalisés).

2.4.2 Digue de protection contre les inondations

Le second cas d'étude concerne une investigation menée sur les levées de la Loire dans le Val d'Orléans, dans le cadre de chantiers expérimentaux de renforcement de digues par des méthodes de mélange en place. Les essais Perméafor ont été menés sur cinq sites de renforcement potentiel par écran étanche, afin de connaître les perméabilités relatives entre le corps de digue, son support et les alluvions sableuses et ainsi ajuster la profondeur du rideau [Graphique 4]. Sur cette digue de classe A de protection contre les inondations, les Perméafor ont été menés depuis la crête de digue et descendus dans le substratum imperméable constitué par les argiles vertes. Les résultats des mesures [Graphique 5] mettent en évidence :

- un corps de digue imperméable globalement mais présentant des niveaux et passages plus perméables ;

- une fondation également imperméable jusqu'à 8 m, correspondant aux alluvions modernes de type limon, dont les caractéristiques de perméabilité ne peuvent être dissociées de celles de la digue ;
- la présence d'alluvions très perméables entre 8 et 11 mètres,



Graphique 8 : Coupe schématique de principe de la digue et positionnement de l'essai Perméafor (pk)

Ce résultat montre clairement un accord total entre les résultats Perméafor et la lithologie du carotté et celle indicative résultant de l'analyse du pénétromètre statique selon la méthode de Robertson [10]. Ces résultats permettent de noter l'intérêt d'un couplage direct entre le Perméafor et le pénétromètre statique. De plus, des essais plus « ponctuels » de type Lefranc/Nasberg permettent de confirmer les résultats Perméafor obtenus lorsque la perméabilité du matériau entre dans la gamme de mesure de l'appareillage.

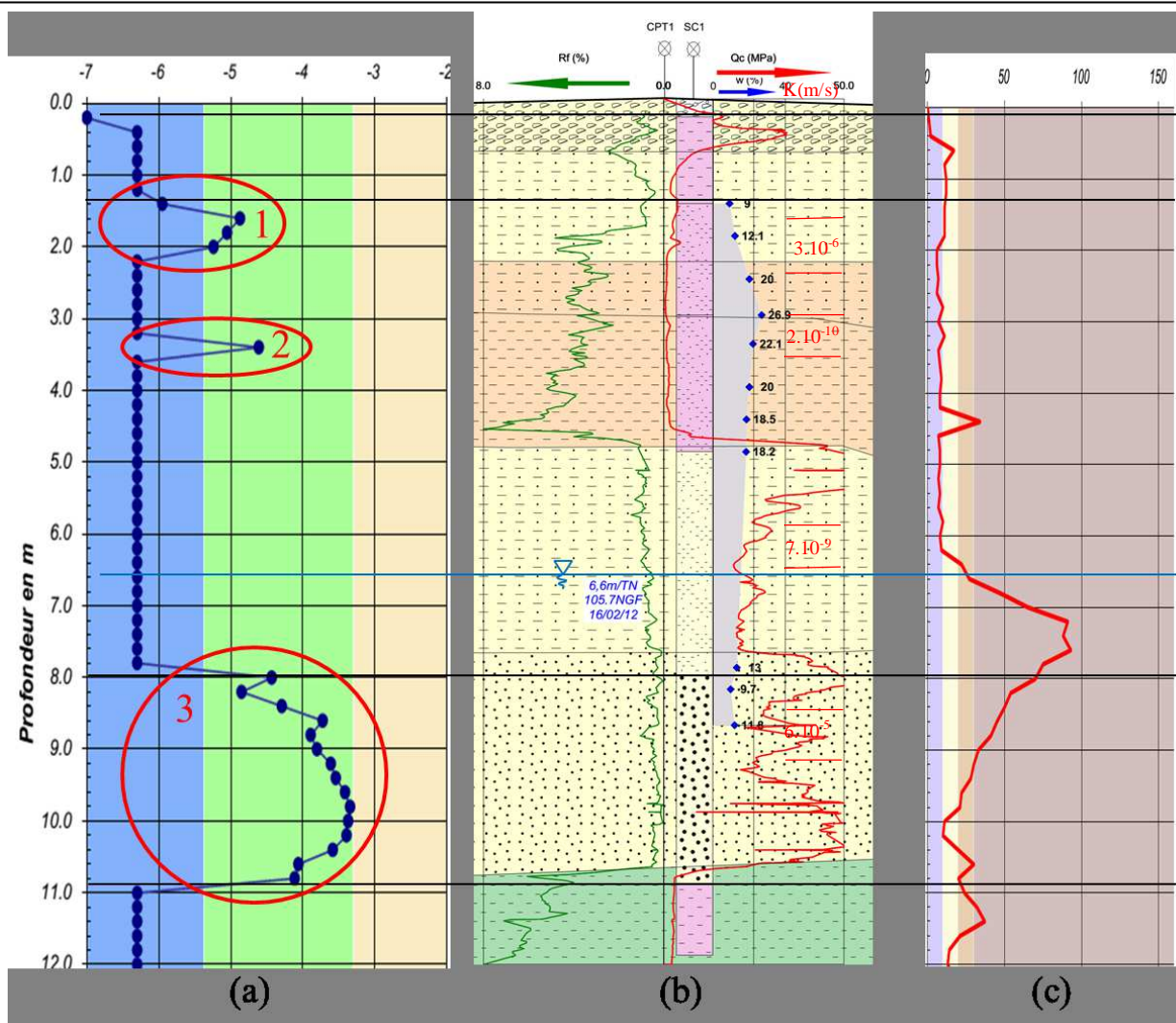
2.4 Synthèse et limitations

D'un point de vue théorique le calcul de la perméabilité avec l'essai Perméafor suppose un écoulement laminaire expliquant en partie une valeur seuil de 10^{-2} présentée pour les perméabilités les plus élevées. A l'inverse une valeur seuil minimale de $10^{-6.3}$ est préférée lorsque le temps de mesure (5 à 30 s) n'est pas suffisant pour mesurer un débit significatif. Les deux cas d'études précédents exposent ce comportement rendant impossible la détection de variations de perméabilité (même qualitatives) au sein de ces horizons (soit très perméables, soit très imperméables).

Cependant, l'outil a permis de montrer qu'une description qualitative à haute résolution verticale de la perméabilité hydraulique était possible. Ces résultats montrent également que l'outil s'avère pertinent à la fois dans le cadre du dimensionnement des ouvrages et lors de leur diagnostic.

3. RECHERCHE & DEVELOPPEMENT : PASSE

Devant l'intérêt de l'outil pour des questions sociétales tel que la sécurité des digues et barrages, de nouvelles améliorations au premier matériel ont été proposées lors d'une première phase de modernisation. L'objectif était alors de pouvoir s'affranchir des différentes limitations que proposait le précédent matériel. Ces premières améliorations portées au matériel datent de 2007, date où le LCPC (actuel IFSTTAR) lança i) l'amélioration de la mesure afin d'augmenter les plages de validité du matériel, ii) la capacité de rendre quantifiable le mesurande [4 ;9].



Graphique 9 : Bloc figure présentant (a) le schéma résultat du log de perméabilité mesuré en profondeur à proximité du carottage SC1. La figure (b) présente la coupe interprétée du sous-sol issue du rapport géotechnique réalisé par la société Fugro Géoconsulting comprenant l'analyse stratigraphique, la coupe du sondage carotté les résultats au pénétromètre statique, et les essais de perméabilité Lefranc/Nasberg (en rouge). La figure (c) présente la courbe de fonçage de l'essai renseignement la compacité des matériaux rencontrés. Trois cercles rouges illustrent des variations brutales de perméabilité et les tracés noirs les limites entre les couches.

3.1 Ajout d'une cellule de pression

L'un des inconvénients majeurs de l'outil Perméafor dans sa version initiale est qu'il ne permettait pas de mesurer directement la charge hydraulique imposée au niveau de la crépine. Cette grandeur est en fait déduite i) de la position de la pointe dans le forage, ii) de la charge hydraulique appliquée, iii) de la position de la nappe, iv) de la perte de charge dans le système hydraulique. Plusieurs calibrations étaient alors proposées afin de fournir une charge H' corrigée. Cependant, du fait des approximations réalisées la valeur corrigée contient toujours une erreur trop importante pour que la gamme de validité de l'appareil ne puisse être étendue. C'est pourquoi, une cellule de pression interstitielle est introduite sur le tuyau d'injection au-dessus de la pointe du Perméafor. Couplée à un nouveau dispositif de pilotage cette nouvelle connaissance permet alors de connaître précisément la charge hydraulique imposée et de mieux asservir l'essai.

3.2 Adjonction d'une pointe CPTu

La condition de l'essai ne permettant pas d'appréhender de manière qualitative la mesure de perméabilité des ajustements supplémentaires judicieux sont apportés à l'appareillage. En effet, une pointe électrique (piézocone) est adjointe à la pointe du Perméafor permettant d'améliorer la qualification des horizons sondés à l'aide de la classification de Robertson [10].

4. RECHERCHE & DEVELOPPEMENT : PRESENT & FUTUR

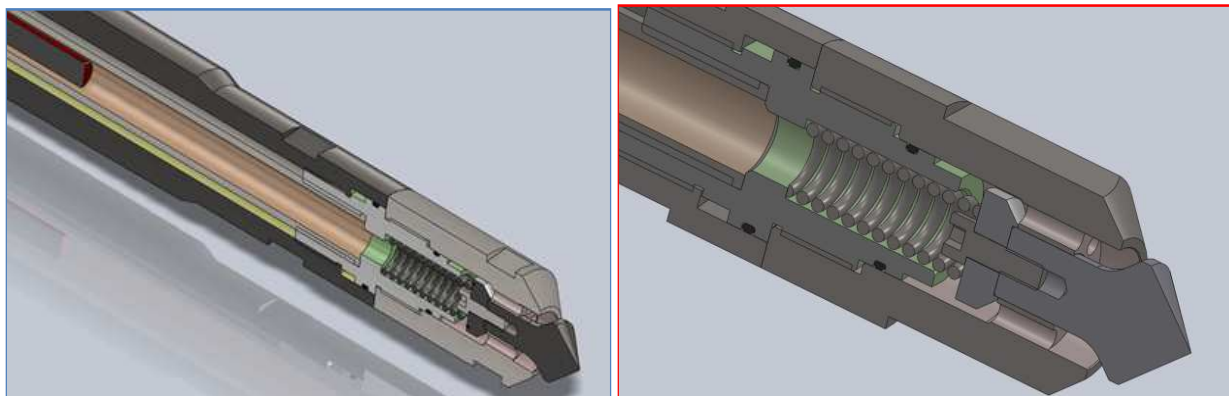
Une seconde phase d'amélioration du matériel et de son utilisation a débuté en 2009 dans le cadre de l'opération de recherche structurante et incitative DOFEAS (Digues et Ouvrages Fluviaux, Erosion, Affouillement, Séisme) Pilotée par l'IFSTTAR, le CETE Normandie Centre et le CETMEF et faisant intervenir le Réseau Scientifique et Technique du MEDDE.

4.1 Nouvelle outil d'interprétation

Même si l'essai s'est toujours limité à ne fournir qu'un log de Q/H et une courbe de fonçage, l'objectif à terme a toujours été de pouvoir fournir une valeur quantifiée robuste de la perméabilité. Cependant, les tentatives passées se sont toujours bornées à vouloir emprunter un facteur de forme utilisable seulement dans le cadre d'écoulements en milieu saturé et infini. Afin d'améliorer la quantification du résultat, une nouvelle approche est proposée. Cette approche basée sur une modélisation de l'essai Perméafor dans un milieu partiellement saturé permet, par analyse inverse, d'approcher la perméabilité vraie du terrain. Ce modèle de perméabilités vraies « $k(z)$ » devant permettre d'expliquer au mieux l'essai dans sa globalité. De plus, grâce à ce traitement, de nombreuses informations issues de l'essai pourront être prise en compte tel que la quantité d'eau injectée lors du fonçage, l'effet de couches minces très perméables ou très imperméables, le résultat de classification de Robertson, etc.

4.2 Double point d'injection

Dans le cadre de cette communication le paramètre perméabilité est toujours représenté sous la forme d'un scalaire (soit une valeur pour un volume de matériau). Or, aussi bien les milieux naturels qu'anthropiques présentent une anisotropie de perméabilité. De plus, dans de nombreux cas, c'est cette anisotropie qui va rendre le comportement hydraulique d'un ouvrage instable. C'est pourquoi une nouvelle pointe (perméamètre VH) permettant en plus de l'injection horizontale, d'injecter de manière quasi-verticale dans le sol, a été développée. Le Graphique 6 présente deux plans en coupe de cette nouvelle pointe. L'objectif à court terme étant de pouvoir délivrer une diagraphie qualitative de la perméabilité hydraulique verticale du milieu. Pour piloter la double injection, un nouveau module Perméafor a été mis au point et fabriqué avec le concours du CECP d'Angers. Il est disponible depuis juin 2013 et fera l'objet de tests au second semestre 2013.



Graphique 10 : Schémas présentant la nouvelle pointe Perméafor à double injection (perméamètre VH) avec (a) la zone d'injection verticale. La figure (b) ne présente qu'un grossissement du premier schéma.

4.3 Perspective d'application nouvelle : vers une caractérisation in situ de l'érodabilité des sols

Le Perméafor a montré sa pertinence pour la mesure de la conductivité hydraulique sur les ouvrages hydrauliques en remblai. Les modifications récentes de l'appareil permettent d'envisager une application parfaitement nouvelle à l'essai consistant à déterminer un critère d'érodabilité des matériaux sondés. En effet, lors d'un essai d'eau à une profondeur définie, nous prévoyons d'augmenter par palier la charge hydraulique imposée. A partir d'une certaine charge hydraulique des phénomènes de type colmatage et/ou départ de particules devrait alors se produire modifiant la conductivité hydraulique du matériau à proximité de la crépine. Cette évolution de la perméabilité pouvant être enregistrée par une modification des débits d'entrée nous espérons pouvoir qualifier des matériaux plus ou moins érodables à mettre en lien avec les essais de laboratoire de type « Suffusion test » ou « MoJET » [3,8].

5. CONCLUSIONS

L'essai Perméafor se positionne aujourd'hui comme un outil de mesure en place de la perméabilité au même titre que les essais plus conventionnels tel que l'essai Lefranc. De plus, ses spécificités matérielles (en particulier la pointe du Perméafor) permettent d'afficher une réelle plus-value et de travailler de manière complémentaire avec les essais plus quantitatifs. Les différents résultats obtenus sur ouvrage en charge et sur ouvrage de protection contre les inondations tendent à montrer la pertinence de l'essai pour le diagnostic des ouvrages et la détection de fuites. Au travers de ces études, plusieurs limitations sont dévoilées quant à l'utilisation de l'outil impliquant la qualitativité du résultat. En conséquence, plusieurs travaux de Recherche passés et en cours de réalisation sont présentés afin de s'affranchir des limitations liées au premier appareil. Ces recherches ont permis entre autre d'améliorer la robustesse de la mesure in-situ et de s'affranchir des pertes de pression liées au système hydraulique. Enfin, des études récentes tendent à montrer que l'information issue du module Perméafor le plus récent (module avec pointe à double injection ou celle équipée d'une pointe CPTu) permettrait de remonter à un log de perméabilité beaucoup plus précis ainsi qu'à avoir accès à l'anisotropie de perméabilité.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier EDF-CIH pour son implication dans le projet et pour sa collaboration dans la réalisation de cette communication. De plus les auteurs voudraient remercier le Plan Loire Grandeur Nature pour le financement des études dans le cadre des Chantiers Expérimentaux (www.plan-loire.fr).

7. RÉFÉRENCES

- [1] AFNOR, Octobre 2000. NFP94-131 – Sols : Reconnaissance et essais – Essai d'eau Lefranc. Norme Française, 18 p.
- [2] Cassan, M. (2005). *Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols*. Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, 568 p.
- [3] Chevalier, C., Reiffsteck, P. (2009). *Essais à l'érodimètre à jets mobiles sur la levée de l'Authion*, Rapport pour le PN ERINOH, 38 p.
- [4] Dorbani, B., Haza-Rozier E., & Reiffsteck, P. (2010) Appareillage pour diagraphie de perméabilité incluant un piézocône, *JNGG2010*, Grenoble 7-9 Juillet 2010.
- [5] Fargier, Y., Fauchard C. , Meriaux, P., Royet, P., Palma Lopes, S., François, Côte, P., D., & Bretar, F. (2012). Methodology applied to the diagnosis and monitoring of dikes and dams, *Risk Assessment*, **14**.
- [6] Fell, R., & Fry, J.-J. (2007). The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. *Internal Erosion of Dams and their foundation*, Editeurs Fell & Fry.
- [7] Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), 1000 – 1024.
- [8] Marot, D., Alexis, A., & Bendahmane, F. (2007). A specific triaxial device for the study of internal erosion in cohesive soils. *Internal Erosion of dams and their foundations*, Editeurs Fell & Fry, 159-166
- [9] Reiffsteck P. (2009). Campagne de validation du Perméafor, application aux graves du Rhin, Rapport de recherche LCPC 11P061.
- [10] Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration test: A unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**(1), 1337 – 1355.
- [11] Royet, P. (2006). *La surveillance et l'entretien des petits barrages*. Cemagref.
- [12] Ursat, P. (1992). Le Perméafor. Un appareil de diagraphie de perméabilité. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, 178, 19-26.
- [13] 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, Copenhague vol.1, 1297 – 1301