

Mesures de très faibles perméabilités *in-situ* et en laboratoire sur les argilites de Tournemire (Aveyron). Méthodologies comparées et effet d'échelle

par JEAN-YVES BOISSON*, JUSTO CABRERA*, LUCIEN BERTRAND** et JEAN-FRANÇOIS HEITZ**

Mots clés. – Argilites, Toarcien, Perméabilité, Effet d'échelle.

Résumé. – A la demande de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), la société ANTEA est intervenue sur le site de Tournemire (Aveyron) pour caractériser sur le plan hydraulique les formations du Toarcien et Domérien, épaisses de 200 m, et accessibles au travers d'un tunnel. On a procédé à des mesures de perméabilité par la méthode du pulse-test en forage, soit sur une chambre longue, soit au droit de zones fissurées plus perméables. Les essais ont permis de déterminer une valeur approchée de la charge hydraulique, et un ordre de grandeur de la perméabilité à échelle métrique à décimétrique (10^{-11} à 10^{-13} m/s). Un forage a été équipé ensuite pour une mesure de charge hydraulique de longue durée (6 mois) dans le massif.

Des mesures en laboratoire ont été effectuées sur des échantillons Ø 4 cm provenant de carottes prélevées dans différents forages. Ces essais, sous contraintes triaxiales, ont nécessité une phase préliminaire de saturation-consolidation de l'éprouvette. L'application d'un écoulement en régime permanent ou d'un choc hydraulique ont permis de mesurer une perméabilité de l'ordre de 10^{-14} m/s pour la matrice du matériau argileux. L'écart entre les valeurs en laboratoire et *in-situ* s'explique par la présence de fissures dans le massif. D'autre part, il semble que les conditions hydrauliques régnant dans le terrain autour du forage au moment de la mesure puissent avoir une influence sur le résultat final.

In situ and laboratory measurements of very low permeability in the Tournemire argillites (Aveyron). Comparison of methodologies and scale effect

Key words. – Argillites, Toarcian, Permeability, Scale effect.

Abstract. – At the request of the *Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire* (IPSN – Institute of Nuclear Safety and Protection), ANTEA visited the Tournemire site (Aveyron) to carry out an hydraulic characterization of the 200 m-thick Toarcian and Domerian formations accessible by tunnel. Permeability measurements were made using the borehole pulse-test method either in the global hole or perpendicular to more permeable fractured zones. The tests yielded an approximate value for the hydraulic head and an order of magnitude for the permeability at 1 to 10 metre scale (10^{-11} to 10^{-13} m/s). A borehole was then equipped for a long-duration (6 months) measurement of the hydraulic head in the rock body.

Laboratory measurements were made on 4 cm-diameter core samples taken from different boreholes. The tests, carried out under triaxial stress, required preliminary saturation-consolidation of the test samples. Through applying steady-state flow or hydraulic pulse, it was possible to measure a permeability in the order of 10^{-14} m/s for the matrix of the clayey material.

The difference between laboratory and *in situ* values is explained by the presence of fractures in the rock body. Moreover, it seems that the hydraulic conditions of measurement in the field around the hole could have an influence on the final result.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The *Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire* (IPSN – Institute of Nuclear Safety and Protection) is carrying out a programme aimed at obtaining information on the properties of engineered barriers in deep geological formations. Argillites being one of the media of interest owing to its impermeability, the IPSN selected the Tournemire tunnel (Aveyron Dept.) for carrying out studies of potential fluid transfer at all scales within such rocks. The tunnel crosses a 200-m-thick formation of clays (Toarcian and Domerian) covered by more than 250 m of limestone (Dogger). The conditions under which the investigations were carried out by IPSN are fairly representative of deep formations.

Using boreholes and two galleries, it has been possible to (a) obtain a detailed characterization of the clay formation surrounding the tunnel (petrographic and structural data), (b) carry out a number of *in situ* tests, and (c) obtain the samples necessary for laboratory studies. On the basis of these data, the IPSN requested ANTEA to perform *in situ* hydraulic characterization tests using methods particularly suitable to media with very low permeability. The *in situ* measurements were completed by laboratory tests on samples.

In situ measurements

In addition to stress measurements through hydraulic stimulation of the fractures in the downward-drilled borehole (ID 180), two types of hydraulic measurement were carried out at the site.

– Measurements of permeability (ID 180): the method used was of the transient regime pulse-test type, suitable for very low values of permeability. A special probe enabled short chambers (1.5 m long) to be tested in zones in which fractures have been located, as well as the complete borehole (103 m). An evaluation of the hydraulic head at equilibrium, within each chamber, was made over periods of 2 to 3 days. The results in terms of permeability (in the sense of Darcy) ranged from 10^{-11} to 10^{-13} m/s for the short fractured zones, and down to 1.4×10^{-14} for the entire borehole.

* CEA/IPSN/DPEI/SERGD, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses cedex.

** ANTEA, Direction Production et Développement, BP 6119, 45061 Orléans cedex 02.

Manuscrit reçu le 23 juin 1997; accepté après révision le 9 février 1998.

– Long-duration measurements of the hydraulic head (ID 180) : equipping the borehole with a packer, a down hole shut-in valve and pressure sensors made it possible to monitor the return of the hydraulic head to equilibrium in a long chamber (75 m) over a period of 6 months. The final value (i.e. a slight overpressure with respect to the tunnel depth) appears to be independent of regional rainfall.

Laboratory measurements

Permeability tests, under triaxial stress, were carried out in ANTEA's geomechanical laboratory. The confining stresses and hydraulic back-pressures were defined in accordance with the preceding *in situ* tests. The samples, taken from boreholes with various orientations, were packed in special storage cells. Both the diameter and length of the test samples were 4 cm.

The test methodology was adapted according to the duration necessary for the fluid pore pressure homogenization during the preliminary saturation-consolidation phase. From a permanent steady-state regime under constant head, the methodology moved to the application of a non-steady state pulse-test type which, within a period of 10 days, enabled a reliable assessment of the permeability, in the order of 10^{-14} m/s ($\pm 20\%$). With a more marly sample, a constant head test revealed a permeability highly dependent on the applied gradient.

Comparative interpretation

The typical permeability of the matrix of the argillites ranges from 10^{-14} to 10^{-15} m/s, whereas that of the fracture zones ranges from 10^{-11} m/s to 10^{-13} m/s. These results are determined from the laboratory tests on centimetre-size samples as well as from the *in situ* tests at scales from a few metres to around 10 m.

The hydraulic head seems to be distributed linearly between the values in the two aquifers embedding the argillites. However, the problem remains concerning the nature of the flows in this environment : the fracture network, for which the geometry and density are still to be determined, probably plays a predominant role with respect to the matrix with a much lower conductivity.

INTRODUCTION

L'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) effectue des recherches dans le domaine de la sûreté des installations nucléaires et des sites de stockage de déchets radioactifs. Il développe entre autre, un programme visant à acquérir des connaissances sur les propriétés de barrière des formations géologiques profondes, c'est à dire leur capacité à confiner sur de très longues périodes de temps les substances radioactives et ce, afin d'être en mesure de juger du bien fondé des options des études effectuées par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), dans le cadre de sa mission de stockage. Les argilites étant un des milieux retenant l'intérêt dans différents pays, notamment en France, pour des opérations de stockage de déchets de longue durée de vie par suite de son imperméabilité, l'IPSN s'est intéressé au site de Tournemire pour y conduire des études relatives à ce thème dans le but de tenter de caractériser, à différentes échelles de temps et d'espace, les possibilités de transferts au sein d'argilites liasiques.

Le choix d'un site dans l'argile s'est porté sur un ancien tunnel ferroviaire de 1885 m de long, situé au voisinage du village de Tournemire, dans l'Aveyron [Barbreau *et al.*, 1993]. Ce tunnel traverse, sur la plus grande partie de son trajet, une épaisse formation d'argilites (argiles très consolidées), d'âge toarcien et domérien (Jurassique), de plus de 200 m d'épaisseur, surmontée par 270 m de calcaires bajobathoniens, de telle sorte que les conditions géotechniques et hydrogéologiques sont assez représentatives des conditions réelles d'une argile qui serait située en profondeur pour un vrai stockage (fig. 1). L'environnement hydrogéologique du site est simple : les calcaires et dolomies de l'Hettangien et du Carixien sous les argilites domériennes contiennent un aquifère régional en charge, et la base aalénienne des calcaires surmontant les argiles toarciennes contient une petite nappe captive.

L'objectif principal des recherches menées sur le site IPSN de Tournemire vise à identifier et caractériser les possibilités de transferts dans le système naturel : compréhension des processus à la fois dans la matrice et dans la phase fluide. Ces études sont basées sur l'analyse des fluides interstitiels de la formation argileuse, soit à partir des carottes de forages, soit directement *in situ* à partir des forages eux même équipés à cette fin. Les méthodes mises en œuvre incluent des méthodes géochimiques, dont un important volet consacré à l'utilisation des traceurs isotopiques naturels de l'eau de formation pour les grandes échelles de temps [Michelot *et al.*, 1995 ; Ricard, 1993], des caractérisations pétrophysiques vis à vis des transferts (diffusion, perméabilité), et des caractérisations hydrodynamiques dans les argilites (répartition des charges...). On a porté également notre attention sur l'identification et la caractérisation de certaines zones fissurées naturelles potentiellement plus favorables à ces transferts (circulations anciennes, et possibilité de transferts actuels). A terme il s'agit d'établir un modèle de la situation hydrodynamique du site, et de son évolution passée afin d'identifier l'existence et la nature de possibles transferts dans de telles roches.

Les travaux qui sont poursuivis depuis 1991, ont consisté en la réalisation de forages carottés à partir du tunnel (14 au total), et le creusement de deux galeries de trente mètres chacune. Il a été ainsi possible de caractériser parfaitement la formation argileuse sur quelques centaines de mètres autour du tunnel, de réaliser un certain nombre d'essais *in situ* (notamment hydrauliques) à différents niveaux dans les argilites, et de disposer des échantillons nécessaires pour les caractérisations et expérimentations à conduire au laboratoire.

L'IPSN avait déjà réalisé sur ce site par le passé un certain nombre de mesures de perméabilité *in situ* et en laboratoire [Barbreau *et al.*, 1993]. Il a paru nécessaire de reprendre les mesures *in situ*, en mettant en œuvre des tests le mieux adaptés possible aux formations de très faibles perméabilités (longue stabilisation avant et après essai, parfait contrôle des matériels mis en œuvre...). Ceci a été possible,

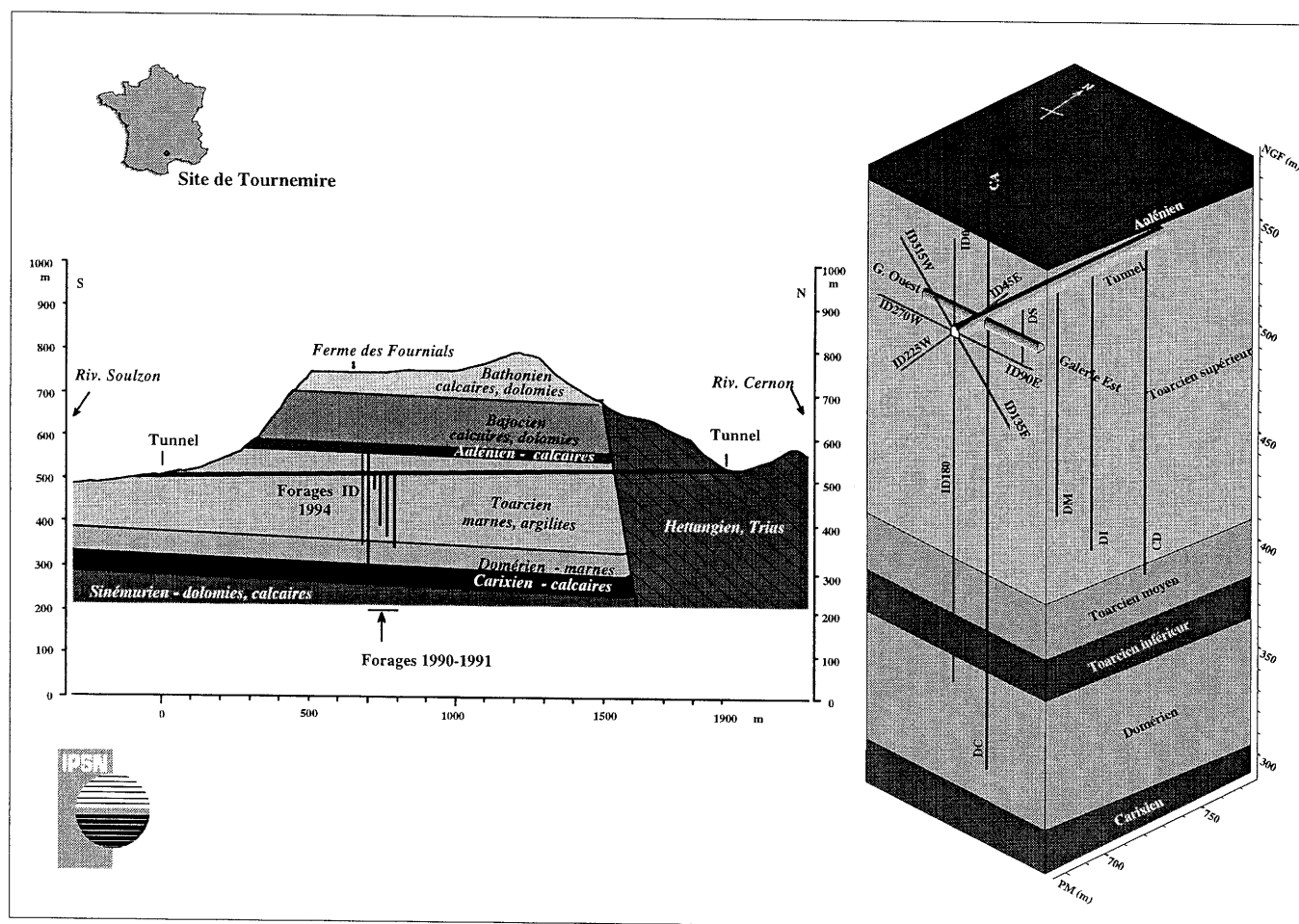


FIG. 1. – Coupe géologique schématique et bloc diagramme du site de recherche IPSN Tournemire.

FIG. 1. – Simplified geological cross-section and block-diagram of IPSN Tournemire research site.

suite à la réalisation de huit forages autour du tunnel (ID0 à ID180, cf. fig. 1) qui ont permis à l'IPSN de disposer d'une parfaite connaissance des horizons rencontrés (tant pétrographique que structurale). Les essais par pulse-test (choc hydraulique) en sondage ont été mis en œuvre dans le forage ID180 (fig. 1) par la société ANTEA. Le choix des zones retenues par l'IPSN dans le forage permettait de tester des zones d'argilite parfaitement saines et des zones où pouvaient être isolées des fractures parfaitement identifiées. On a en outre réalisé un essai en chambre simple, de grande longueur (environ 100 m), permettant d'intégrer sur une hauteur significative un grand nombre d'hétérogénéité du terrain. Ces essais ont été complétés par des essais au laboratoire de mesures de perméabilité sous contraintes « triaxiales » et sous faible gradient hydraulique, sur échantillons répartis sur toute la colonne sédimentaire.

On avait également par le passé tenté de réaliser des mesures de pression interstitielle fiables afin de disposer d'une connaissance de la répartition des charges hydrauliques au sein des argilites entre les deux aquifères. Il avait été installé au début du programme un dispositif d'auscultation hydrogéologique (capteurs de pression en chambre fermée, de type pointe B.A.T.) dans quatre forages dédiés à cette fonction : ces dispositifs n'ont pas donné entière satisfaction. La mesure *in situ* des charges hydrauliques au sein des formations argileuses indurées de très faibles perméabilités est apparue d'une grande difficulté tant pour sa faisabilité technique, qu'en ce qui concerne la signification

physique des résultats obtenus. La confrontation des résultats avec un modèle envisagé nécessitait l'acquisition de données supplémentaires plus précises.

C'est pourquoi un nouveau programme visant à obtenir de nouvelles valeurs de pressions en forage a été mis en œuvre grâce au concours de la société ANTEA, d'une part par estimation des charges en régime stabilisé avant et après les derniers essais de perméabilité *in situ* à partir de tests en régime transitoire (pulse test), et par l'équipement du forage ID180 pour mesure de la charge hydraulique en chambre fermée, sur une période de plusieurs mois.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ EN LABORATOIRE

Les échantillons testés au laboratoire de géomécanique d'ANTEA proviennent de carottes, issues de forages d'orientations diverses. Aussitôt après le carottage, les tronçons choisis ont été conditionnés dans des cellules de stockage spéciales, destinées à conserver la teneur en eau et la masse volumique initiales du matériau, et lui assurer un léger confinement mécanique.

Ces échantillons sont choisis afin que l'axe de l'éprouvette selon laquelle s'applique le gradient soit orienté selon plusieurs angles par rapport à la lithologie, et que les éprouvettes proviennent de différentes profondeurs par rapport au tunnel et représentent plusieurs faciès. Le but des essais est

de tenter de caractériser l'influence de la profondeur (ou de la contrainte), celle de la lithologie, celle de l'orientation, et enfin celle de la proximité du tunnel.

Les mesures de perméabilité sont effectuées à l'eau pure, et sous contraintes triaxiales, les valeurs de confinement et les pressions du fluide interstitiel étant choisies en accord avec les mesures in-situ réalisées préalablement.

Banc d'essai utilisé

On a choisi un modèle de cellule triaxiale, et son banc d'essai associé largement utilisés pour l'étude du comportement mécanique de matériaux argileux profonds. Les éprouvettes ont un diamètre et une hauteur de 40 mm.

L'originalité de ce banc est la possibilité de contrôler les contraintes mécaniques et les pressions de fluide au moyen de dispositifs asservis numériquement, et pilotés par ordinateur. Cette technique assure une parfaite régulation des différents paramètres pendant toute la durée des essais. Le banc d'essai permet notamment d'appliquer toute sorte de sollicitation hydraulique sur l'éprouvette.

Phases de déroulement d'un essai

Saturation-consolidation sous contraintes triaxiales

Après confection, contrôle et montage de l'éprouvette en cellule, on procède à la phase préalable de saturation-consolidation, indispensable pour replacer le matériau dans des conditions mécaniques et hydrauliques proches de l'état initial.

Compte tenu de la très faible valeur de la perméabilité du matériau, on applique les contraintes mécaniques (σ_1 et σ_3) et les pressions de fluide (u_{amont} et u_{aval}), par paliers, répartis sur une durée de 3 à 5 jours jusqu'aux valeurs finales afin de limiter la génération de surpressions interstitielles.

L'homogénéisation des pressions de fluide interstitiel et les déformations de l'échantillon sont contrôlées tout au long de la phase de consolidation, dont la durée est de plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Les critères d'arrêt sont à la fois la stabilisation de la déformation axiale de l'éprouvette et la stabilisation des échanges de fluide entre l'éprouvette et le circuit de contre-pression.

Le comportement du matériau pendant cette phase permet d'adapter la méthodologie ultérieure pour la mesure de la perméabilité.

Essai hydraulique

Deux méthodes ont été utilisées.

a) Application d'un gradient hydraulique constant entre les extrémités amont et aval de l'éprouvette, et mesure du débit Q en régime permanent.

Si l'échantillon a une hauteur h , et une section A , et si $\rho.g$ est le poids volumique de l'eau, le gradient hydraulique i est égal à :

$$i = \frac{u_{\text{amont}} - u_{\text{aval}}}{\rho.g.h} \quad \text{et le débit } Q = K.A.i \text{ (loi de Darcy)}$$

On contrôle les pressions interstitielles u_{amont} et u_{aval} (en pratique u , maintenu constant au moyen d'un capteur de pression différentielle inclus dans une boucle d'asservissement), et on mesure Q_{amont} et Q_{aval} . L'obtention d'un régime permanent nécessite des durées de plusieurs jours à plusieurs semaines. Les valeurs de gradient appliqué doivent rester faibles ($\Delta u/u < 10\%$) afin de ne pas provoquer une phase de consolidation significative (apparition de surpres-

sions interstitielles, dont la dissipation pourrait fausser la valeur du débit sortant). Il en résulte des valeurs de débit à mesurer très faibles. L'égalité des débits entrant et sortant est rarement atteinte.

La limite raisonnable de cette méthode, compte tenu du matériel utilisé, se situe dans l'intervalle de perméabilité 1.10^{-12} m/s à 1.10^{-13} m/s. En pratique, la méthode n'est donc pas applicable ici.

b) Application d'un choc hydraulique sur une extrémité de l'échantillon : cette méthode, proposée par Hsieh *et al.* [1981] et Neuzil *et al.* [1981], permet d'accéder à une estimation de la perméabilité jusqu'à 10^{-14} m/s sous une dizaine de jours environ, après consolidation.

Les faces amont et aval de l'éprouvette étant reliées à deux réservoirs fermés, à pression u , on applique instantanément dans le réservoir amont un accroissement de pression Δu_0 . La suppression créée dans le réservoir amont Δu_{amont} se dissipe au travers de l'éprouvette, et la pression dans le réservoir aval augmente de Δu_{aval} .

L'interprétation est basée sur l'équation de diffusivité d'un fluide faiblement compressible, en milieu poreux saturé. Elle suppose que le squelette solide de l'échantillon soit incompressible.

$$\frac{\Delta u_{\text{amont}}}{\Delta u_0} = F_1(\alpha, \beta) \quad \text{et} \quad \frac{\Delta u_{\text{aval}}}{\Delta u_0} = F_2(\alpha, \beta)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{K.t}{h^2.S_s} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{S_s.A.h}{S_{\text{am}}}$$

K et S_s étant la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement spécifique de l'éprouvette de section A et hauteur h , S_{am} l'emmagasinement du réservoir amont (égal à celui du réservoir aval).

Les fonctions F_1 et F_2 sont représentées sous forme d'abaque (fig. 2).

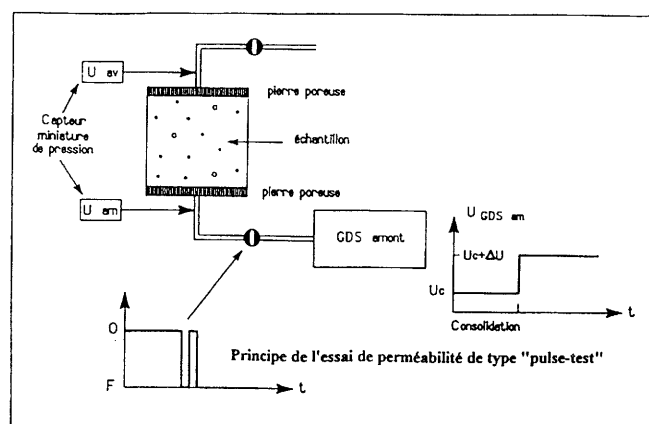
Résultats obtenus

Les tableaux I et II résument les résultats obtenus sur les 5 échantillons testés. Malgré la diversité de provenance des différents échantillons, les valeurs de perméabilité obtenues sont extrêmement faibles. La porosité du matériau, calculée à partir des essais de caractérisation, est de l'ordre de 7 %, et les caractéristiques physiques mesurées sur les différents échantillons assez semblables. Cependant l'échantillon n° 04014, plus marneux, prélevé en toit du tunnel, dans une zone tectonisée bien distincte, montre une perméabilité qui dépend largement du gradient hydraulique appliqué, et ceci avec une bonne correspondance entre débit entrant et débit sortant. On peut émettre l'hypothèse que des microfissures, dont l'ouverture est sensible à la valeur de la contrainte effective, puissent affecter cet échantillon et créer des chemins d'écoulement préférentiels.

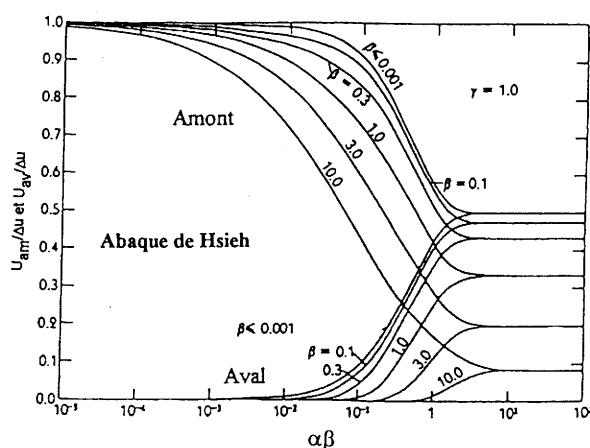
MESURE DE LA PERMÉABILITÉ IN-SITU DANS LE FORAGE VERTICAL DESCENDANT ID 180

Mesures de perméabilité par pulse-tests

• La méthode utilisée est celle de l'essai en régime transitoire, de type pulse-test, bien adapté aux très faibles valeurs de perméabilité. Au cours de ces tests, on crée, dans une partie du sondage isolée, une perturbation positive ou négative de la charge hydraulique, puis on observe le retour à l'équilibre de la charge (la chambre de mesure étant maintenue fermée). Pour ce type d'essai, la chambre de mesure



(a)



(b)

FIG. 2. – (a) Dispositif de mesure par choc hydraulique et (b) abaque de Hsieh (définition de $\alpha = \frac{K \cdot t}{h^2 \cdot S_s}$ et $\beta = \frac{S_s \cdot A \cdot h}{S_{am}}$)

FIG. 2. – (a) Measurement layout for pulse-tests and (b) solution curves by Hsieh (définition of $\alpha = \frac{K \cdot t}{h^2 \cdot S_s}$ and $\beta = \frac{S_s \cdot A \cdot h}{S_{am}}$)

TABL. I. – Caractéristiques physiques des éprouvettes.

TABLE I. – Physical characteristics of tested samples.

N° échantillon	γ_h (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	Description lithologique (Toarcien supérieur)
ID 180 n° 04043	2,55	2,47	3,3	2203	1123	Argilites gris noires micacées bien litées
ID 180 n° 08014	2,51	2,43	3,2	2427	1281	Argilites gris noires micacées bien litées
ID 180 n° 12015	2,57	2,49	3,3	non testé (échantillon dégradé)		
ID 90 n° 04020	2,56	2,50	2,4	3493	1282	Argilites gris noires micacées bien litées
ID 000 n° 4014	2,58	2,50	3,2	3449	1598	Marnes grises et bancs calcaires
ID 225 n° 3975	2,55	2,49	2,5	2834	1560	Argilites gris noires finement litées

γ_h : masse volumique humide
 γ_d : masse volumique sèche

w: teneur en eau pondérale

V_L : vitesse des ondes de compression
 V_T : vitesse des ondes de cisaillement

TABL. II. – Résultats des mesures de perméabilité en laboratoire.

TABLE II. – Results of permeability tests in laboratory.

N° Echantillon	Remise en contraintes/consolidation				K régime permanent			Pulse test
	σ_r (MPa)	u_c (MPa)	σ'_r (MPa)	durée	Gradient (m/m)	Δu (kPa)	K (m/S)	K (m/s)
ID 180 n° 04034	7,25	2,9	4,35	35 jours	100 725	40 290	$< 10^{-13}$	-
ID 180 n° 08014	8,25	3,3	4,95	117 jours	-	-	-	$1,5 \pm 0,3 \cdot 10^{-14}$
ID 090 n° 04020	4,3	0,2	4,10	31 jours	-	-	-	$1,3 \pm 0,3 \cdot 10^{-14}$
ID 000 n° 4014	3,1	0,2	2,90	26 jours	250 500	100 200	$6 \cdot 10^{-13}$ $1 \cdot 10^{-11}$	-
ID 225 n° 03975	4,3	0,5	3,8	27 jours	-	-	-	$1,0 \pm 0,2 \cdot 10^{-14}$

σ_r : contrainte radiale totale de confinement

σ'_r : contrainte radiale effective de confinement

u_c : pression interstitielle de consolidation

Δu : pression différentielle appliquée pendant l'essai

est isolée au moyen d'un obturateur simple pour un test en fond de trou, ou d'un obturateur double pour un test sur une partie quelconque du trou.

L'interprétation d'un essai nécessite de connaître la charge hydraulique initiale, en principe à l'équilibre. Cette détermination constitue la première étape du test. La se-

conde est la création du choc hydraulique, suivi de la mesure de la charge pendant le retour à l'équilibre.

• Le train de test utilisé comporte une sonde développée par ANTEA, qui permet de descendre dans le forage au câble. Cette solution, réservée aux terrains très peu perméables, permet d'intervenir avec un dispositif de mesure al-

légé. La sonde est modulaire (un ou deux obturateurs, comme indiqué en figure 3) et est adaptée aux forages Ø 76 mm à 101 mm.

Le dispositif, raccordé en surface à un système de pressurisation, permet de créer des chocs hydrauliques, de mesurer la compressibilité apparente de la chambre, et d'enregistrer au moyen d'une centrale d'acquisition l'ensemble des paramètres de l'essai.

• L'interprétation de la courbe expérimentale traduisant les variations de la charge en fonction du temps, en milieu poreux, homogène et isotrope, est celle proposée par Bredehoeft et Papadopoulos [1980] et Cooper *et al.* [1967]. Elle utilise l'équation de diffusivité pour un écoulement transitoire radial, en tenant compte des conditions aux limites appropriées.

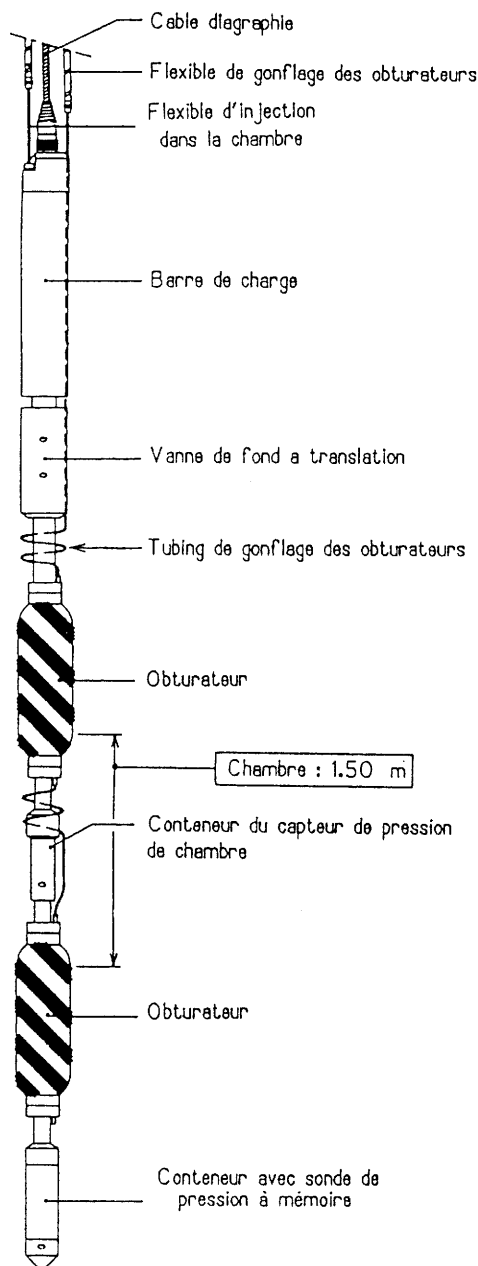


FIG. 3. – Sonde pour mesure au câble des faibles perméabilités.

Fig. 3. – Antea wire-line permeability tool for low-permeability measurement.

La solution analytique est de la forme

$$\Delta H / \Delta H_0 = F(\alpha, \beta)$$

$$\text{avec } \alpha = S \cdot \frac{\pi r_w^2}{V_w \cdot C^* \cdot \rho \cdot g} \quad \text{et} \quad \beta = T \cdot t \cdot \frac{\pi}{V_w \cdot C^* \cdot \rho \cdot g}$$

où r_w est le rayon du forage, T et S la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du terrain, V_w le volume d'eau dans la chambre, C^* la compressibilité apparente de la chambre, ρ le poids volumique de l'eau.

Une adaptation de cette solution pour les milieux fissurés [Wang *et al.*, 1977], peut aussi être utilisée.

Le calage semi-automatique des points expérimentaux sur la solution analytique permet de déduire T et S . Ce calage est réalisé sur le terrain au moyen du logiciel IMPULSE (développé au BRGM), implanté sur PC.

Il est essentiel d'évaluer la compressibilité apparente C^* de la chambre (compressibilité de l'eau, du matériel et du terrain autour du forage). Celle-ci est mesurée à chaque essai lors de la réalisation du choc hydraulique.

Résultats obtenus

Un essai sur une chambre globale de 103 m, puis quatre essais sur les zones en principe les plus perméables, où avaient été repérées de fines fractures, ont été conduits dans le forage. Les essais ont permis de réaliser une première évaluation de la charge hydraulique au droit de chaque chambre, sur une durée de 1 à 2 jours, avant la création des chocs hydrauliques. Bien que ces durées soient trop courtes pour prétendre à une stabilisation complète, l'évolution de la charge initiale est estimée suffisamment lente pendant la durée du test pour que l'on puisse interpréter les essais réalisés postérieurement à ces phases de stabilisation.

La réalisation du test global n'a pas présenté de difficulté particulière. Par contre les données issues des chambres courtes sont parfois difficilement interprétables (test n° 5, et test n° 1, abandonné). Le tableau III regroupe les résultats obtenus au cours de cette campagne. Un exemple de courbes est donné en figure 4 (essai n° 4).

→ L'analyse des résultats obtenus dans ces conditions in-situ conduit à retenir, pour les zones potentiellement fracturées, des valeurs de perméabilité qui se situent probablement entre 1.10^{-12} m/s et 1.10^{-13} m/s. Pour le reste du forage (matrice argileuse), on calcule des valeurs aux alentours de 1.10^{-14} m/s.

Mesure de la charge hydraulique

Équipement utilisé

A la fin des différentes investigations décrites précédemment, le forage ID 180 est équipé d'un dispositif permettant d'isoler une chambre entre 78 m et le fond du trou, à 160,1 m, au moyen d'un obturateur hydraulique muni d'une vanne de fond. Un capteur de pression (absolue) mesure la charge dans la chambre fermée, et un autre permet de suivre les fluctuations de niveau dans l'annulaire, au-dessus de l'obturateur. Ces capteurs, ainsi que d'autres permettant de connaître la pression barométrique et la pression de gonflage de l'obturateur, sont reliés à une centrale d'acquisition de données. Cette centrale autonome, de grande résolution, scrute les différentes voies de mesure à raison de 6 mesures par 24 h. Le suivi sera ainsi assuré entre le 7 septembre 1995 et le 26 mars 1996. Une courte interruption a lieu le 23 novembre 1995, en raison de travaux dans le tunnel à proximité du forage.

TABL. III. – Résultats des mesures de perméabilité in-situ.

TABLE III. – Results of site measurements of permeability.

Test	Cotes (m)	Epaisseur testée	Description générale	Fracturation	Méthode Bredehoeft-Papadopoulos		
					T (m ² /s)	S	K (m/s)
global	57,0-160,1	103,1 m	-	-	1,4.10 ⁻¹²	4,5.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻¹⁴
1	41,0-42,5	1,5 m	argilite gris-noir, micacée, bien litée	fracturation sub-verticale, remplissage calcite	-	-	-
2	61,5-63,0	1,5 m	argilite gris-noir, micacée, bien litée	zone de faille avec dominos	2,0.10 ⁻¹²	5.10 ⁻⁷	1,3.10 ⁻¹²
3	146,3-147,8	1,5 m	marne gris-noir et banc marno-calcaire	zone de faille avec calcite striée	1.10 ⁻¹³	9.10 ⁻⁷	6,7.10 ⁻¹⁴
4	103,6-105,1	1,5 m	marne gris noir et banc marno-calcaire	plans striés avec remplissage de calcite	1,5.10 ⁻¹³	1.10 ⁻⁶	1.10 ⁻¹³
5	41,5-43,0	1,5 m	argilite gris-noir micacée, bien litée	fracturation sub-verticale, remplissage calcite	3,5.10 ⁻¹¹ 2.10 ⁻¹²	1,5.10 ⁻⁶ 1.10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻¹¹ 1,3.10 ⁻¹²

Evolution de la charge hydraulique

– L'évolution globale de la charge est présentée en figure 5. On constate qu'une période de plus de deux mois est nécessaire pour obtenir une première stabilisation correcte de la charge. La valeur finale est confirmée par la seconde phase des mesures, à partir de décembre 1995. (La remontée observée en novembre est nettement plus rapide que celle de septembre 1995).

La charge se stabilise à une valeur de l'ordre de +14 m par rapport au niveau du radier du tunnel.

– La charge mesurée dans la chambre est indépendante de la pluviométrie, mais fluctue en fonction de la pression barométrique, comme tout aquifère captif en milieu poreux. On peut contrôler [Castany, 1963, ch. 19] que le rapport B est conforme aux valeurs usuelles :

$$B = \frac{\Delta H}{\Delta P_{\text{barom}} / \rho \cdot g} = -0,58$$

ΔH : variations de charge, ΔP_{barom} : variation de pression barométrique, $\rho \cdot g$: poids volumique de l'eau.

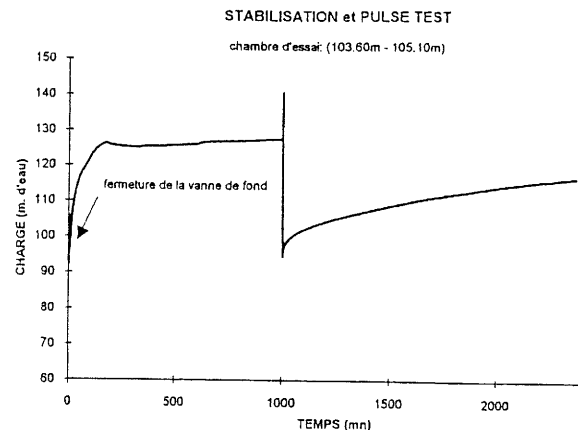
– Il est cependant difficile d'en déduire avec certitude d'autres paramètres. La prise en compte d'une valeur de porosité effective de quelques % pour le terrain, et un module élastique vertical de l'ordre de 20 000 MPa, conduisent à un coefficient d'emménagement de l'ordre de 1 à 2.10⁻⁴, valeur plutôt supérieure à celles déduites des essais en forage (essai global notamment).

– Si on interprète comme un pulse-test la remontée de pression de novembre 1995, consécutive à l'obturation du forage au début des mesures de charge stabilisée, ainsi qu'un choc hydraulique réalisé en fin de période de mesure (mais dont les résultats sont fragmentaires suite à un incident technique), on est conduit à des valeurs de K (ou T) et surtout de S considérablement supérieures aux valeurs antérieures obtenues lors du test global (fig. 6a et 6b).

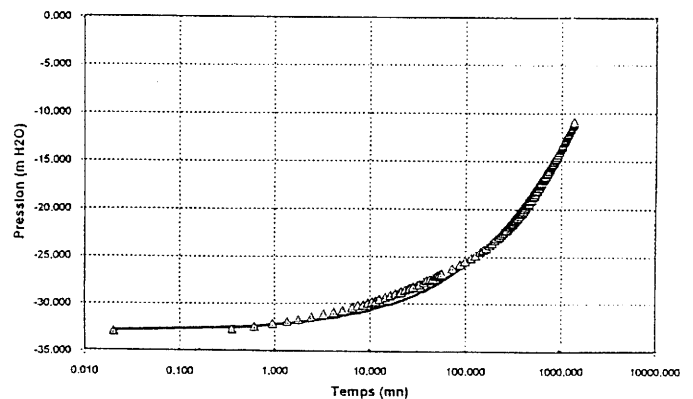
COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Mesures de charge hydraulique

La valeur de charge stabilisée obtenue en fin d'expérimentation est à comparer avec celles obtenues lors d'autres investigations, et naturellement celles mesurées dans les deux aquifères qui encadrent les argilites.



Essai n° 4, cote 103,60 m - 105,10 m - Forage ID180



RÉSULTAT DE L'AJUSTEMENT

Méthode d'interprétation: Bredehoeft et Papadopoulos
Porosité d'Interstice

- Transmissivité 1,50E-13 (m²/s)
- Coef. d'emménagement 1,00E-06
- Coef. perméabilité de Darcy 1,00E-13 (m/s)

FIG. 4. – Courbes P(t) obtenues pour l'essai n° 4.

FIG. 4. – Pulse-tests curves P(t) for test n° 4
— : courbe expérimentale; experimental curve
Δ-Δ : points de calage calculés pour T et S résultant; calculated fitting points for best result (T,S)

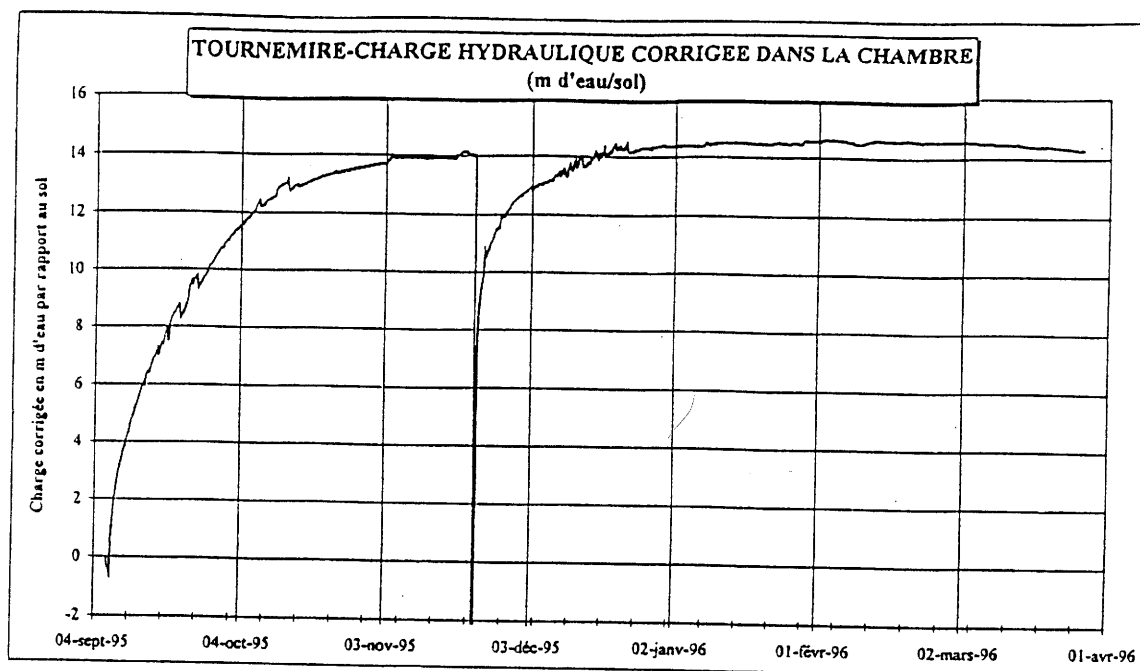


FIG. 5. – Evolution globale de la charge hydraulique (forage ID 180).

FIG. 5. – Plot of hydraulic head (in ID 180 borehole) for the whole measurement period.

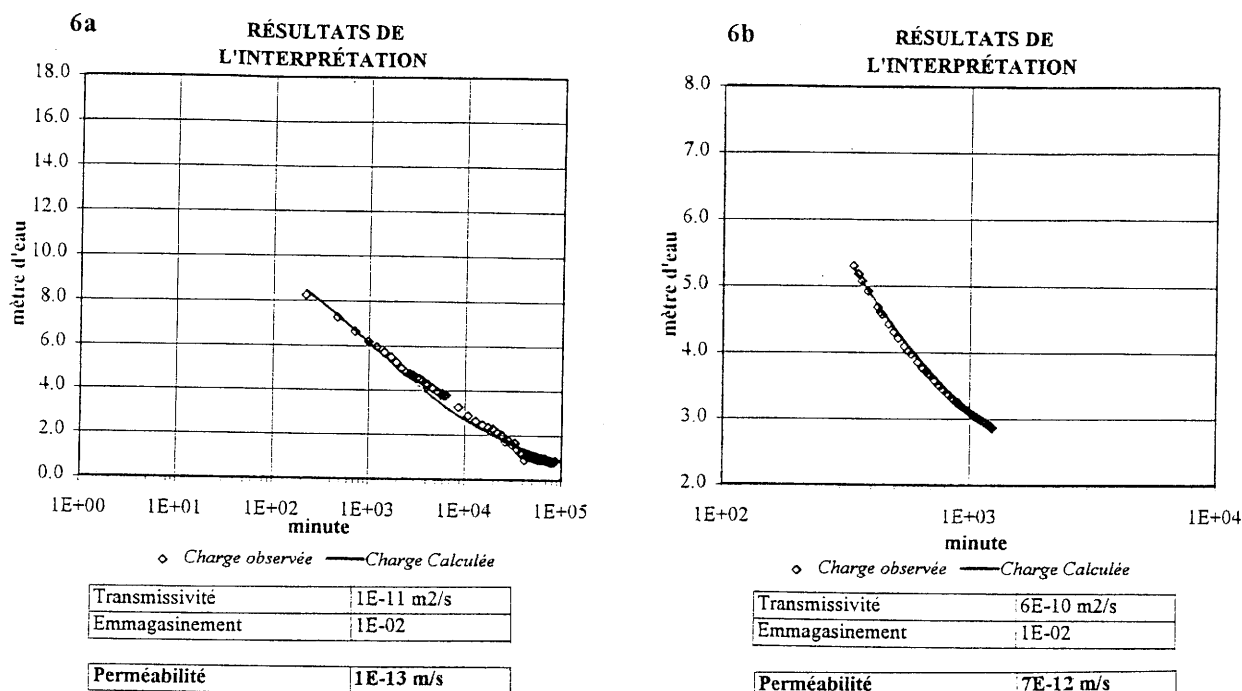


FIG. 6. – Interprétation en terme de perméabilité des deux remontées de pression

6a – Remontée de novembre 1995

6b – Choc hydraulique final

FIG. 6. – K and S determination from the two head recoveries

6a – November 1995 head recovery

6b – Final pulse-test

On a porté sur un graphique (fig. 7) l'ensemble des valeurs disponibles, traduites en potentiel en m NGF, en fonction de l'altitude des points ou des zones de mesure. On y retrouve les valeurs mesurées lors des campagnes antérieures (au moyen de pointes B.A.T, dont certaines ont produit

des résultats douteux), et celles mesurées lors des récents essais. Les valeurs déduites des pulse-tests de 1995, bien que non totalement stabilisées, apportent des indications complémentaires dans le sens où elles encadrent vraisemblablement les valeurs réelles.

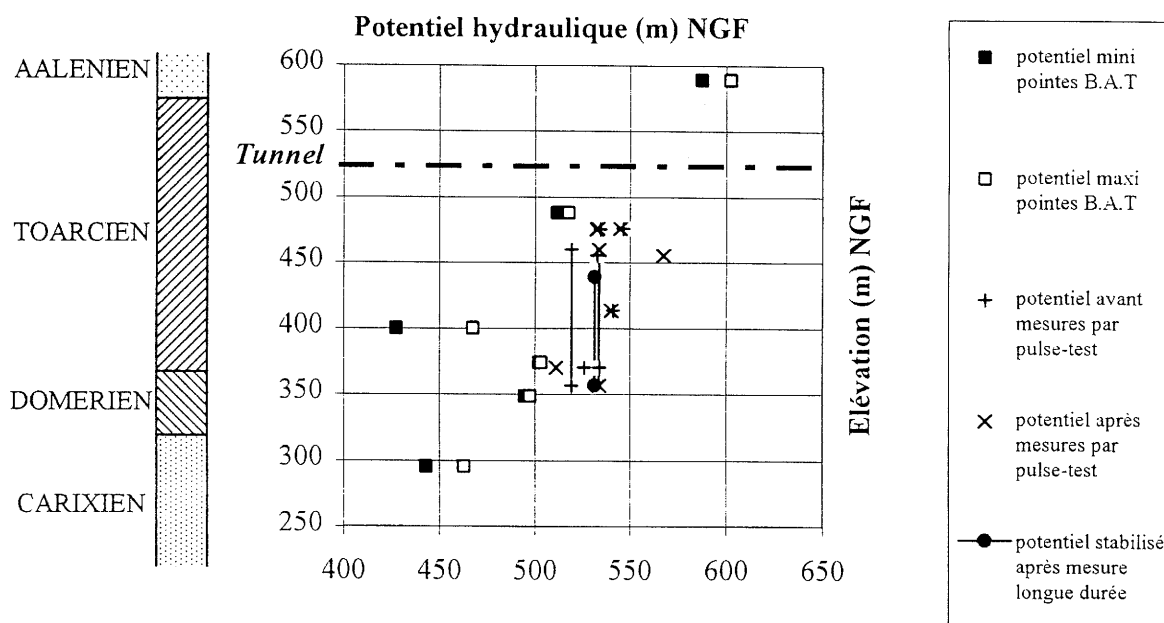


FIG. 7. – Comparaison des potentiels hydrauliques mesurés cote (m) NGF.

FIG. 7. – Comparison of different hydraulic head data (in m NGF).

On constate que, malgré l'incertitude de certaines mesures, l'évolution du potentiel est sensiblement linéaire entre les valeurs extrêmes existant dans l'aquifère de l'Aalénien au-dessus, et dans le Carixien en dessous, au moins dans la partie assez bien explorée en dessous du tunnel. Il n'est pas exclu cependant que le tunnel provoque à son voisinage un drainage de la partie supérieure du Toarcien.

Toutefois, le problème de la nature des écoulements dans ce milieu se pose. Le réseau fissural, dont la géométrie et la densité restent encore à préciser, joue vraisemblablement un rôle important à l'échelle de la formation du Toarcien, par rapport à la matrice beaucoup moins conductrice.

Mesures de la perméabilité

- Les éprouvettes testées en laboratoire sont représentatives du massif, à une échelle centimétrique à décimétrique. Elles représentent essentiellement la matrice du matériau, et les résultats obtenus ne prennent pas en compte les discontinuités recoupées en forage, au travers desquelles la pression interstitielle se transmet dans le massif.

Il semble que la perméabilité typique de la matrice des argilites se situe vers 1.10^{-14} m/s, ou en dessous. Ces résultats supposent que l'on reste dans le domaine d'application de la loi de Darcy.

Il reste toutefois à améliorer ou développer les méthodes de mesure existantes en laboratoire, en prenant mieux en compte l'effet des contraintes sur les échantillons.

- Les mesures in-situ couvrent en principe une échelle métrique à décamétrique, du moins dans la direction de l'axe du forage. Les transferts de fluide entre le massif et le forage se produisent au travers des fissures et des pores de la matrice. Les modifications de contrainte effective, liées aux variations de pression du fluide interstitiel, provoquent nécessairement des modifications de l'ouverture des fissures, et peuvent donc affecter sensiblement la contribution du réseau de fissures dans ces transferts.

Après un drainage du massif par le forage d'une durée de plusieurs mois, on peut faire l'hypothèse que la zone déchargée s'étend sur un rayon de plusieurs mètres autour

de ce forage. Si on réalise un pulse-test après une phase de stabilisation de quelques dizaines d'heures seulement, ou après plusieurs mois de remise en charge, l'état des contraintes effectives au sein du massif est différent, et la réponse du massif à une sollicitation hydraulique dans le forage peut être également assez différente.

Ceci pourrait expliquer les écarts de perméabilité (et peut être aussi en partie les écarts de coefficient d'emménagement) constatés entre les premiers essais de juillet 1995 et ceux entrepris ultérieurement lors de la remise en charge du massif, le réseau de fissures étant globalement plus fermé au voisinage du forage dans le premier cas que dans le second.

La perméabilité en grand du massif semble donc dépendre des conditions de réalisation des mesures. Compte tenu des données actuellement disponibles, on peut admettre qu'elle se situe probablement dans la gamme de 1.10^{-11} m/s à 1.10^{-12} m/s ou 1.10^{-13} m/s.

CONCLUSION

À l'issue des différentes investigations conduites sur le site de Tournemire, la mesure de la perméabilité des argilites du Toarcien se révèle comme une entreprise complexe et encore largement perfectible.

- Les mesures en laboratoire, sur éprouvettes de taille centimétrique, permettent d'appréhender la perméabilité de la matrice du matériau. La méthode en régime transitoire, plus rapide que celle en régime permanent, paraît mieux adaptée, voire la seule, pour ce type de matériau. L'interprétation pourrait prendre en compte ultérieurement la déformabilité du matériau sous l'effet des variations de contrainte effective. La perméabilité typique de la matrice des argilites déduite des essais sous contraintes triaxiales, à l'issue d'une phase de consolidation d'un mois environ, semble se situer dans la gamme de 1.10^{-14} à 1.10^{-15} m/s.

- Les pulse-tests, réalisés en forage, conduisent à des résultats assez dispersés. Les valeurs de perméabilité et d'emménagement obtenues semblent dépendre des conditions expérimentales, et notamment de l'état de remise en charge hydraulique du massif autour du forage. La perméabilité à

échelle plurimétrique à pluridécamétrique se situe sans doute entre 1.10^{-11} à 1.10^{-12} , voire 10^{-13} m/s.

De nombreuses interrogations persistent à l'issue de ces travaux, relatives à la compréhension du comportement de

ce type de matériau, à la fois sur le plan hydraulique que du point de vue mécanique. Des investigations complémentaires dans ces deux domaines, tant en laboratoire qu'in situ, devraient apporter des éléments de réponse.

Références

- BARBREAU A. & BOISSON J.-Y. (1993). – Caractérisation d'une formation argileuse : synthèse des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire de janvier 1992 à juin 1993 – Contrat CCE-CEA n° FI 2W CT91-0115 Rapport EUR 15736FR.
- BREDEHOEFT J.D. & PAPADOPOULOS S.S. (1980). – A method for determining the hydraulic properties of tight formations – *Water Res. Res.*, **16**, 233-238.
- CASTANY G. (1963). – Traité pratique des eaux souterraines – Dunod, Paris, 658 p.
- COOPER H.H., BREDEHOEFT J.D. & PAPADOPOULOS S.S. (1967). – Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water – *Water Res. Res.*, **3**, 263-269.
- HSIEH P.A., TRACY J.V., NEUZIL C.E., BREDEHOEFT J.D. & SILLIMAN S.E. (1981). – A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rocks : I. theory – *Internat. J. rock mechanics, mining sciences and geomechanics*, **18**.
- MICHELOT J.L., RICHARD P., BARBREAU A. & BOISSON J.Y. (1995). – Environmental isotope study of pore water and of fracture calcites in the Tournemire Toarcian claystones : sampling, analyses, and preliminary interpretation. In : Proc. OECD/NEA International Workshop on Hydraulic and hydrochemical characterisation of argillaceous rocks, Nottingham 7-9 June 1994 – OECD Documents, 133-136.
- NEUZIL C.E., COOLEY C., SILLIMAN S.E., BREDEHOEFT J.D. & HSIEH P.A. (1981). – A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rocks : II. Application – *Internat. J. rock mechanics, mining sciences and geomechanics*, **18**, 253-258.
- RICARD P. (1993). – Etudes isotopiques des fluides interstitiels et des minéraux de fracture dans les argilites toarciennes de Tournemire (Aveyron). – Thèse de Docteur es Sciences, Université de Paris-Sud (Orsay, France).
- WANG J.S.Y., NARASIMHAN T.N., TSANG C.F. & WITHERSPOON P.A. (1977). – Transient flow in tight fractures. In : *Proc. the 1st International well testing Symposium*, Berkeley, USA, 103-113.