

Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Propriétés hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien dans l'Est du bassin de Paris : comparaison des résultats obtenus selon différentes approches

Jacques Delay^{a,*}, Alain Trouiller^b, Jean-Marc Lavanchy^c

^a *Andra, Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, RD960, 55290 Bure, France*

^b *Andra, Direction scientifique, parc de la Croix-Blanche, 1–7, rue Jean-Monnet, 92298 Châtenay-Malabry cedex, France*

^c *COLENCO Power Engineering SA, Täfelnstraße 26, 5405 Baden, Suisse*

Reçu le 9 février 2006 ; accepté après révision le 28 juillet 2006

Disponible sur Internet le 16 octobre 2006

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

L'Andra mène, depuis 1994, un ensemble de recherches pour déterminer les propriétés hydrogéologiques, dont la perméabilité, de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien dans l'Est du bassin de Paris et, plus particulièrement, sur le site du laboratoire souterrain situé sur la commune de Bure, dans le Sud du département de la Meuse. La détermination d'un tel paramètre dans une argile raide de très faible perméabilité pose de nombreuses questions, à la fois théoriques (la loi de Darcy est-elle applicable ?), méthodologiques et techniques (comment obtenir des valeurs représentatives de la formation ?). Cet article présente la démarche et les moyens qui ont été adoptés pour permettre d'atteindre cet objectif, c'est-à-dire approcher de la façon la plus fiable et précise possible la valeur de ce paramètre, son incertitude, son anisotropie et sa variabilité éventuelle en fonction de la lithologie. Les résultats obtenus à partir des mesures sur échantillons et à l'aide d'une série de tests, aussi bien en forages profonds réalisés depuis la surface qu'en forages courts depuis la galerie d'expérimentation à 445 m de profondeur, sont cohérents, bien que les méthodes et les échelles d'investigation soient différentes. À l'échelle du site du laboratoire, la perméabilité est inférieure à 10^{-12} m s⁻¹ sur toute l'épaisseur de la formation d'argilite, avec une valeur minimum estimée à 10^{-14} m s⁻¹. Les premiers résultats des tests dans la galerie d'expérimentation du laboratoire souterrain, à 445 m de profondeur montrent, en grand, la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien. *Pour citer cet article : J. Delay et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Hydrodynamic properties of the Callovo-Oxfordian formation in the East of the Paris Basin: comparison of results obtained through different approaches. Since 1994, Andra has carried out a series of research programs in order to determine the hydrogeological properties, including permeability, of the Callovo-Oxfordian argillaceous formation of the Paris Basin, and more specifically of the site of the underground laboratory located on the township of Bure, in the South of the Meuse district. Determining such a parameter in a very low permeability argillaceous rock raises a number of questions: theoretical (is the Darcy law still valid?), methodological as well as technical (how can values representative of the formation be obtained?). This article

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : jacques.delay@andra.fr (J. Delay), alain.trouiller@andra.fr (A. Trouiller), jean-marc.lavanchy@colenco.ch (J.-M. Lavanchy).

presents the approach and means adopted to achieve this goal, i.e., to obtain for this parameter a value as reliable and precise as possible, and to determine its uncertainty, its anisotropy and possible variability according to the lithology. The results obtained from measurements carried out on samples, as well as through a series of tests carried out in deep boreholes from the surface and short boreholes from the experimentation drift at 445-m depth, are coherent, although the methods and investigation scales are different. At the scale of the laboratory site, permeability is below 10^{-12} m s^{-1} over the entire thickness of the argillaceous formation, with a minimum value estimated at 10^{-14} m s^{-1} . The first results from tests carried out in the experimental drift of the underground laboratory at 445-m depth confirm the very low bulk permeability of the Callovo-Oxfordian formation. **To cite this article: J. Delay et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Bassin de Paris ; Callovo-Oxfordien ; Argilites ; Perméabilité ; France

Keywords : Paris Basin; Callovo-Oxfordian; Argillaceous rock; Permeability; France

Abridged English version

Since 1994, ANDRA has been carrying out a series of research programs in order to determine the hydrogeological properties, including permeability, of the Callovo-Oxfordian argillaceous formation of the Paris Basin, and more specifically of the site of the underground laboratory located on the township of Bure, in the South of the Meuse district.

Permeability and porosity of the argillites

Determining such a parameter in a very low permeability argillaceous formation raises a number of questions: theoretical (is the Darcy law still valid?), methodological as well as technical (how can values representative of the formation be obtained?).

The permeability of a geological environment, a notion experimentally established by Darcy in 1856 [13], expresses the linearity between the water flow and the hydraulic head gradient; it is a macroscopic parameter, which, therefore, assumes that the porous environment cannot be deformed, since the flow is laminar and no interaction occurs between the fluid and the solid skeleton of the environment.

However, in predominantly argillaceous rock formations, considering the structure of the water molecule [25], which allows electrostatic links with the crystalline structure of the minerals to occur, the interstitial water is found in different states: (i) adsorbed in the argillaceous layers, (ii) adsorbed at the surface of the argillaceous minerals – this water would be hardly or not at all mobile by hydraulic head gradient [17] –, and (iii) free between the minerals and argillaceous aggregates.

If the size of the pores is less than 10 nm, the structure of the water molecules in the double layer zone along the argillaceous layers eliminates convection [17]. In the case of the Callovo-Oxfordian argillaceous rocks,

different methods for measuring porosity on samples were implemented in order to establish a conceptual model of the environment porosity [27]. The share of porosity with access diameters at the pores under 10 nm corresponds to 40% of the overall porosity, which represents about 7% bound water.

Permeability measurements campaigns

Permeability tests carried out using boreholes drilled between 1994 and 2004 covered an area of several hundred square kilometres [12], and focused in 2003 and 2004 on the site of the Bure laboratory (South of the Meuse district) (Fig. 1). Since the end of 2004, an extensive measurement program has been implemented in the experimental drift at 445-m depth of the underground laboratory.

Permeability measurements on core samples

Permeability measurements on samples have been carried out parallel and perpendicular to the stratigraphy, yielding permeability anisotropy estimations. Table 1 presents the results obtained from samples taken in the Callovo-Oxfordian [2] formation as well as the laboratories which carried out the measurements. Vertical permeability evaluations [KV] range between 2.4×10^{-16} and 1.5×10^{-12} m s^{-1} . Horizontal permeability evaluations [KH] range between 9.1×10^{-15} and 7.6×10^{-13} m s^{-1} .

Permeability measurements in deep boreholes

Table 2 shows the reference values and permeability variations obtained from deep boreholes and retained for the Callovo-Oxfordian formation. These estimations were derived from the two packer test campaigns carried out in 1994–1996 and 2003–2004, and from long-term pressure monitoring.

Fig. 2 shows the permeability values estimated for the site as a whole. At this stage of interpretation, the coherence of the results representative of the site for the Callovo-Oxfordian formation can be outlined by comparing:

- permeability obtained through various testing methods carried out at similar depths in different boreholes;
- permeability deduced from pressure measurements carried out through long-term monitoring devices and packer tests made at similar depths in the same borehole;
- permeability measured on samples from borehole EST212.

Permeability measurements carried out in the underground laboratory

The devices used at the Meuse/Haute-Marne Laboratory are of two types:

- ‘conventional and retrievable’: double, triple, quadruple or more multi-packer devices;
- ‘definitive sealing’: the annular space is limited by the packers. For certain types of equipment, the annular space located between the mandrel and the borehole wall is filled with resin.

In order to carry out measurements over several months, ‘definitive-sealing’ equipment was used for experimentations carried out at 490-m depth of the Meuse/Haute-Marne underground laboratory.

Fig. 3 shows an example of boreholes and measurement intervals in drift 445 m of the underground laboratory. Tables 3, 4 and 5 present results of permeability tests carried out in these boreholes.

Fig. 4 shows the last measurements acquired at site scale according to knowledge.

We notice a remarkable convergence between data acquired from very long chambers (a few meters to dozens of metres) and very short chambers (20 cm). This confirms the absence of significant tectonic or sedimentary structures in the formation, at the scale of the measuring chambers, as well as its outstanding overall homogeneity.

Conclusions derived from the values obtained as a whole – scale effect

If we only retain the values considered as reliable for in situ measurements as well as for measurements on samples, it is possible to present the permeability of

the different litho-sedimentary units (Fig. 5). No truly perceptible scale effect appears. Permeability measured through in situ investigations is of the same order of magnitude as that obtained from laboratory measurements on samples, even though measurements obtained from the latter are more scattered. At this stage, no significant anisotropy has been noticed.

At the scale of the laboratory site, permeability is below $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ over the entire thickness of the argillaceous formation with a minimum value estimated at $10^{-14} \text{ m s}^{-1}$. The first results from tests carried out in the experimental drift of the underground laboratory at 445-m depth confirm the very low bulk permeability of the Callovo-Oxfordian formation.

The permeability values measured in the Callovo-Oxfordian argillaceous rocks are in agreement with literature data for argillaceous formations. Thus, the permeability of the Opalinus clay (Aalenian argillites in the Swiss Jura) ranges between 10^{-14} and $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ [16] and that of the Toarcian clay at Tournemire (Aveyron) between 10^{-13} and $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ [3].

Permeability test campaigns in the drifts are going on, complementary results at 490 m are under interpretation, and future programs will aim at understanding the coupled hydromechanical–hydrochemical phenomena [6].

1. Introduction

La perméabilité d’un milieu géologique, notion établie expérimentalement par Darcy en 1856 [13], exprime la linéarité entre le flux d’eau et le gradient de charge hydraulique ; c’est donc un paramètre macroscopique, qui suppose le milieu poreux indéformable, le fluide n’interagissant pas avec le squelette solide du milieu et l’écoulement étant laminaire.

Or, dans les roches à dominante argileuse, compte tenu de la structure de la molécule d’eau [25], qui permet des liaisons électrostatiques avec la structure cristalline des minéraux, l’eau interstitielle se trouve sous différents états : (i) adsorbée dans les feuilletts argileux, (ii) adsorbée à la surface des minéraux argileux – alors pas ou peu mobilisable par gradient de charge hydraulique [17] – et (iii) libre entre les minéraux et agrégats argileux.

Ainsi, les interactions entre molécules d’eau et minéraux argileux et la taille des pores imposent de s’interroger sur la validité de la loi de Darcy dans un tel milieu. Si la taille des pores est inférieure à 10 nm, la structuration des molécules d’eau dans la zone de double couche le long des feuilletts argileux annihile la convection [17]. Dans le cas des argillites du Callovo-Oxfordien, les dif-

férentes méthodes de mesure de la porosité sur échantillons (mercure, pétrole, hélium, adsorption d'azote) couplées aux analyses d'images acquises par autoradiographie et au MEB (microscope électronique à balayage) ont permis d'établir un modèle conceptuel de la porosité de ce milieu [27]. La part de la porosité ayant des diamètres d'accès aux pores inférieurs à ces 10 nm correspond à 40% de la porosité totale, ce qui représente environ 7% d'eau liée. Dans les argilites du Callovo-Oxfordien, il existe donc 11% d'eau libre pour le transport convectif comme pour le transport diffusif. Il est possible de considérer que la loi de Darcy est applicable.

D'un point de vue méthodologique, la détermination de la perméabilité des argilites n'est pas chose aisée à réaliser, dès lors qu'aucun écoulement n'est observable, il faut donc vaincre la résistance à l'écoulement de l'eau libre.

Concrètement, il est nécessaire d'injecter un fluide sous fort gradient de pression pour que le débit soit mesurable en un régime d'écoulement stationnaire. Cependant, les protocoles expérimentaux sont susceptibles d'engendrer des artefacts :

- des gradients de pression hydraulique trop élevés peuvent entraîner (i) une modification de la porosité par diminution de la contrainte effective, (ii) des écoulements turbulents, (iii) un déplacement d'eau adsorbée qui modifie le volume d'eau concerné [9] ;
- si un fluide de percolation en déséquilibre chimique avec les minéraux est injecté dans l'argilite, il peut induire des processus osmotiques, de dissolution-précipitation, ou modifier l'épaisseur de la double couche.

La méthode la plus couramment utilisée consiste à provoquer, selon différents protocoles, une perturbation temporaire et limitée de la pression du fluide dans le milieu et à mesurer son retour à l'équilibre (dite méthode du choc hydraulique), ce qui évite d'appliquer de très forts gradients hydrauliques.

Les mesures effectuées in situ sont des tests hydrauliques de courte durée dans différents forages profonds sur le secteur d'étude, et des mesures de récupération de pression à long terme après installation de capteurs de pression. Ces tests hydrauliques ont également été réalisés en préalable à différentes expérimentations géochimiques ou géomécaniques dans le laboratoire souterrain.

En complément de ces enregistrements in situ, un ensemble de mesures a été réalisé en laboratoire sur des échantillons prélevés par carottage lors des forages. Trois types de mesures ont été mis en œuvre. Il s'agit :

- d'une méthode consistant à interpréter l'évolution de profils d'imbibition dans une argilite désaturée, à partir de son isotherme de sorption d'eau ;
- d'une méthode de mesure de flux d'eau tritiée associée aux mesures de diffusion ;
- de tests en régime stationnaire et transitoire à partir d'une cellule triaxiale.

Enfin, d'autres mesures indirectes de la perméabilité font appel, soit à des mesures de caractéristiques pétrophysiques des roches par méthodes géophysiques, soit à l'analyse détaillée de chroniques de pressions et des profils de charges. Dans le premier cas, on peut se référer aux mesures faites par sondes RMN (résonance magnétique nucléaire) [19], qui conduisent à une description détaillée de la porosité, non seulement en termes de volume, mais aussi de structuration géométrique. Le second cas correspond à l'analyse fine des fluctuations de pression dont l'origine est barométrique ou tellurique [7].

2. Analyse des facteurs influençant les tests en forage

Les tests de perméabilité réalisés en forage de 1994 à 2004 couvrent un secteur de plusieurs centaines de kilomètres carrés [12] avec, depuis 2003, une focalisation sur l'emprise du laboratoire de Bure (Sud du département de la Meuse) (Fig. 1). Ils ont été effectués à partir de forages profonds mettant en œuvre les outils de mesure et les techniques d'interprétation issus de l'exploration pétrolière. Au total, 19 tests ont été effectués dans la formation du Callovo-Oxfordien.

Depuis fin 2004, un vaste programme de mesures est mis en œuvre directement dans la galerie expérimentale au niveau 445 m du laboratoire souterrain. Les équipements en galerie et les protocoles de test sont issus des résultats obtenus en forages profonds. Depuis cette date, 48 intervalles de tests font l'objet de mesures dans cette galerie d'expérimentation.

Lorsque l'on cherche à déterminer les paramètres hydrodynamiques à partir d'un test en forage, il serait souhaitable de démarrer les mesures dans les conditions de pression les plus stables possibles.

Or, dans des formations de très faible perméabilité (inférieure à 10^{-12} m s^{-1}), la stabilisation réelle des conditions de pression n'intervient que plusieurs mois après la réalisation proprement dite de l'ouvrage, en raison des effets d'historique de forage [23].

Parmi les artefacts influençant les tests, on peut mentionner les effets :

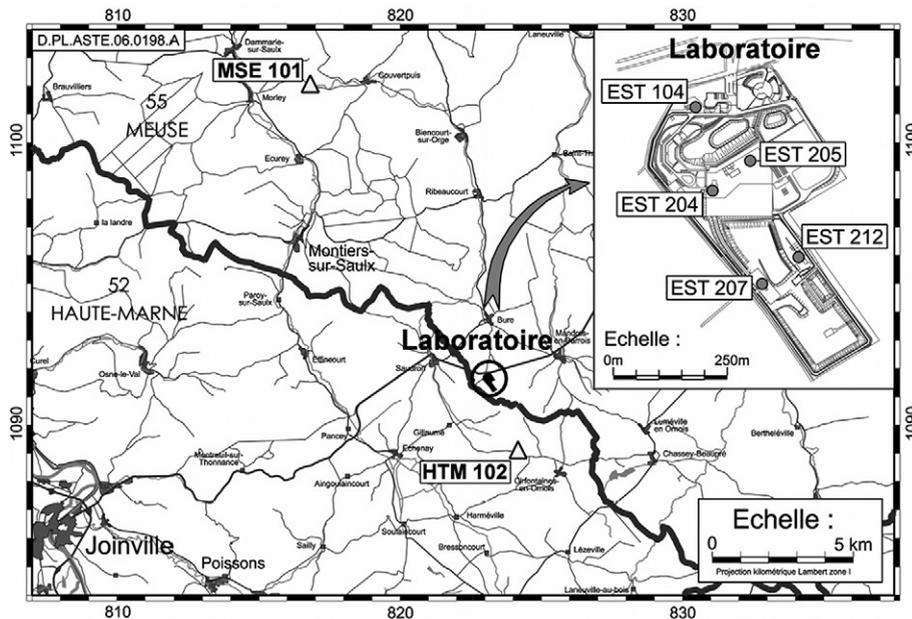


Fig. 1. Localisation des forages de mesures dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Fig. 1. Location of boreholes with scientific measurements in Callovo-Oxfordian argillaceous rocks.

- technologiques, c'est-à-dire les déformations des équipements et en particulier des obturateurs ;
- « d'historique » de puits, c'est-à-dire d'application, pendant une période suffisamment longue avant le test, d'une pression différente de la pression de la formation ;
- thermiques, liés à l'injection d'un fluide de température significativement différente de celle de la formation ;
- mécaniques, de fluage des parois du forage, lié au déconfinement de la roche ;
- physicochimiques et hydromécaniques, liés aux interactions entre le fluide de test et la formation (hydratation des argiles, gonflement, déstructuration de la roche).

Ainsi, dans les faits, il est impossible de réunir les conditions « idéales » pour réaliser une mesure de perméabilité en forage en milieu argileux et, par essence, tous les tests entre obturateurs se déroulent dans des conditions perturbées.

3. Choix techniques et opérationnels pour les tests en forage

Pour des raisons techniques, il est difficile de maintenir un forage intact dans des formations argileuses pour réaliser les tests. Les diverses opérations mises en œuvre par l'Andra ont mis en évidence le fait que la tenue des

forages est mauvaise lorsque le fluide de test est constitué de boue aux polymères (cas des premiers forages entrepris) ; elle est grandement améliorée lorsque le forage est réalisé avec une boue à base d'hydrocarbures (ouvrages à partir de 2003) ou à l'air et lorsque la taille de la chambre de mesure, le volume de tests et des équipements sont minimisés : ce cas n'a été réalisé que dans les galeries du laboratoire souterrain.

Les séries de tests en forages profonds sur la période 1994–2004 ont couvert différentes techniques et conditions de tests :

- intervalles testés de 5 à 50 m dans des forages de diamètre 6 à 8,5 pouces (152 à 216 mm) ; le volume des chambres était de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de litres ;
- courtes durées (24 à 48 h) permettant d'accéder à un ordre de grandeur des valeurs de perméabilité ;
- fluides très variés dans le forage (boue polymère, eau, boue à l'huile, gazole...), donnant des indications sur les effets de fluides de différentes caractéristiques physiques ;
- installation d'équipements de mesure de pression à long terme, fournissant une charge stabilisée, une valeur de perméabilité, et, dans une certaine mesure, d'emmagasinement ;
- couverture de la totalité de l'épaisseur des argilites par les deux types de mesures mises en œuvre (c'est-à-dire à court et à long terme).

Depuis 1996, des sondes électromagnétiques, type « EPG » (*Electromagnetic Pressure Gauge*) [5,11], ont été mises en place dans certains forages, afin de s'affranchir de tous les effets parasites à court terme et d'obtenir des valeurs fiables de charge hydraulique stabilisée après une période de plusieurs années de récupération de pression.

La courbe obtenue peut être interprétée en termes de perméabilité, en faisant l'hypothèse de la conservation de la géométrie de la chambre de mesure.

À partir de la fin 2004, l'accès à la galerie située à 445 m de profondeur a permis une amélioration sensible des conditions expérimentales. Les forages, réalisés à l'air, sont courts (longueur inférieure à 20 m) et de petit diamètre (de 66 à 101 mm), ce qui assure une bonne stabilité de la formation ; ils sont forés rapidement (sur une durée de 24 h) pour limiter le poids de l'« historique de pression ». Les chambres de mesure n'ont que 20 cm de longueur pour augmenter la rigidité des systèmes. Les intervalles sont remplis d'une eau synthétique de composition la plus proche possible de l'eau de formation, de façon à limiter les effets physicochimiques.

Le nombre de chambres de mesures par forage a été limité à cinq. Ces chambres sont isolées par des obturateurs mécaniques ou gonflables, dont la pression est contrôlée régulièrement. Dans la plupart des équipements, l'isolation entre les chambres de mesure est assurée par l'injection de résine dans des intervalles de garde, entre les obturateurs. Les capteurs de pression sont installés dans la galerie, ce qui facilite leur contrôle et leur remplacement.

Les tests de longue durée (plusieurs semaines à plusieurs mois), réalisés dans cette galerie à 445 m, ont ainsi permis de préciser le profil de charge et d'évaluer la perméabilité verticale dans la formation. Compte tenu des très basses perméabilités, les types de tests possibles sont réduits à des chocs de pression en injection et en dépression, ainsi qu'à des injections à pression constante. La resaturation des chambres de mesure après forage à l'air, point critique du protocole d'équipement et de test, a fait l'objet d'une procédure spécifique qui a été mise au point dans le cadre des expérimentations menées au mont Terri, dans le Jura suisse [9].

4. Résultats des mesures sur échantillon

4.1. Méthodologie des tests sur échantillons

Les mesures expérimentales sur échantillons ont été développées en parallèle. En effet, il n'était pas toujours techniquement possible de tester les formations in situ, et les mesures sur échantillons permettent des durées ex-

périmentales plus importantes. Néanmoins, les échantillons sont fortement perturbés par les conditions de prélèvement et de conditionnement. Ainsi, la conduite de tests en laboratoire suppose une certaine maîtrise des conditions de prélèvement, de confinement mécanique, de saturation ainsi qu'une cohésion minimale de l'échantillon.

4.1.1. Conditions expérimentales et estimation de la perméabilité des argilites par l'interprétation d'isothermes de sorption/désorption d'eau et de profils hydriques

Dans le cas de transfert de masse dans les argilites partiellement saturées, la perméabilité peut être déterminée en fonction du degré de saturation, moyennant la connaissance de l'évolution de leur diffusivité globale.

Deux dispositifs expérimentaux différents ont été construits sur ce principe :

- (i) Le premier utilise un bâti œdométrique classique, dans lequel est placée une cellule contenant l'échantillon et constituée de bagues d'acier superposées. En partant d'un degré d'hygrométrie connu, l'échantillon est resaturé par injection depuis la base. Le profil hydrique pour une durée déterminée de resaturation est obtenu par découpage de l'échantillon suivant les bagues. La perméabilité est calculée à partir de plusieurs profils pour des durées différentes, connaissant la courbe de sorption-désorption [26] ;
- (ii) pour le second cas, l'échantillon cylindrique est placé dans une enceinte étanche à humidité relative contrôlée, munie d'un couvercle isotherme. Une pression hydrique est imposée sur la périphérie de l'échantillon. Cette pression est ensuite modifiée, ce qui se traduit par une variation de masse de l'échantillon.

La cinétique d'évolution de la masse est suivie par pesées fréquentes à la microbalance. La perméabilité au liquide est calculée par méthode inverse, en résolvant l'équation de transfert de masse dans un milieu non saturé [21].

Avec le premier dispositif, dix échantillons ont fait l'objet de mesures : sept provenant du forage HTM102, trois du forage MSE101 [14] (voir Fig. 1).

Les résultats obtenus sur les échantillons du HTM102 montrent que la perméabilité à saturation est très faible et relativement homogène sur l'ensemble de la formation. Les valeurs sont comprises entre 10^{-14} et $4 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-1}$ [14].

Les trois valeurs obtenues dans le forage MSE101 présentent une perméabilité globalement identique à celle du HTM102 : les valeurs sont comprises entre 2,8 et $3,8 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-1}$.

4.1.2. Conditions expérimentales de la mesure de flux d'eau tritiée

Cette méthode d'estimation de la perméabilité utilise les essais de diffusion réalisés à l'eau tritiée. À la suite de la réalisation de tests de diffusion, et une fois le régime permanent atteint, une différence de pression a été appliquée entre les cavités amont et aval des cellules de diffusion. Une augmentation du flux de soluté a été observée dans la cavité aval. Cette augmentation est interprétée comme étant la conséquence d'un flux d'eau à travers l'échantillon. Ainsi, après l'évaluation du coefficient de diffusion d'après une solution analytique de la loi de Fick, on calcule le flux convectif en soustrayant le flux diffusif du flux total (dit de perméation).

4.1.3. Conditions expérimentales et interprétation des mesures de perméabilité à l'appareil triaxial

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques taillées dans un morceau de carotte, conditionné dès la sortie du forage en cellule permettant le maintien du confinement mécanique. De ce fait, l'argilite conserve une grande partie de son eau d'origine (saturation à plus de 95% en général). Dans certains cas, un trou borgne est foré dans l'axe de l'éprouvette pour injecter le fluide radialement. Ces mesures ont été réalisées par le Laego [22].

Les mesures de perméabilité sont effectuées parallèlement ou perpendiculairement à la stratification. Le chargement triaxial permet de replacer l'éprouvette dans son état de contrainte in situ. Mais il augmente la pression de pore, même en conditions drainées : le couplage hydromécanique est d'autant plus fort que la perméabilité est faible, et que les surpressions créées par les contraintes mécaniques appliquées sont longues à se dissiper ou à s'homogénéiser au sein de l'éprouvette.

Il faut donc vérifier la stabilisation des pressions avant le démarrage de l'essai proprement dit.

Le fluide d'injection est une eau en équilibre chimique avec la roche.

Deux types d'essais ont été pratiqués :

- les essais en régime permanent (stationnaire) ;
- les essais en régime transitoire de type *pulse-test*.

Les essais en régime permanent n'ont été effectués qu'avec le dispositif d'injection radiale mis au point par le LMS [10]. Les flux à mesurer étant extrêmement

faibles, des gradients relativement élevés sont appliqués. Cependant, la cavité d'injection est scellée à la résine, ce qui limite le risque de court circuit.

De grandes précautions expérimentales sont nécessaires pour maîtriser la stabilité en température ($\pm 0,2^\circ\text{C}$ nécessaire) et la mesure des flux entrant et sortant à pression constante, pendant la durée de l'essai (plusieurs semaines).

La géométrie de l'écoulement est de forme plus complexe ; aussi, chaque échantillon est simulé numériquement avec le code de calcul Castem2000 [4]. Le débit théorique, obtenu pour une perméabilité intrinsèque de référence de 10^{-20} m^2 , est ajusté au débit mesuré, afin de déterminer la perméabilité de l'échantillon testé.

À partir de 1997, plusieurs laboratoires français ont conçu et monté des dispositifs spécifiques pour réaliser ce type d'essai sur les argilites. Ces dispositifs ont fait l'objet de tests d'inter-comparaison dans le cadre du groupement de recherche Forpro¹ [15].

Des tests spécifiques sur des échantillons partiellement désaturés ont également été réalisés dans le but de comprendre les écoulements dans la zone désaturée par le creusement des galeries [20].

L'interprétation des essais est fondée sur la solution analytique de Hsieh [18], soit directement à partir d'abaques (en grandeurs adimensionnelles), soit par méthode inverse.

Enfin, le coefficient d'emménagement ne peut être déterminé que si la pression est proche de la stabilisation.

4.2. Perméabilités obtenues sur échantillons des forages réalisés entre 1995 et 2004

Les mesures de perméabilité sur échantillons ont été effectuées parallèlement et perpendiculairement à la stratigraphie, permettant d'obtenir des estimations de l'anisotropie des perméabilités. Le Tableau 1 présente les résultats sur les échantillons prélevés dans le Callovo-Oxfordien [2], ainsi que les laboratoires ayant effectué les mesures.

Les estimations de perméabilité obtenues sont du même ordre de grandeur que les mesures obtenues par tests à court terme entre obturateurs et chroniques à long terme de pression. Les évaluations de perméabilité verticale [KV] sont comprises entre $2,4 \times 10^{-16}$ et $1,5 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$, celles de la perméabilité horizontale [KH] sont comprises entre $9,1 \times 10^{-15}$ et $7,6 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$.

¹ Partenariat CNRS–Andra.

Tableau 1

Mesures de perméabilité réalisées sur échantillons. KH et KV sont les perméabilités à saturation horizontale et verticale

Table 1

Permeability measurements performed on samples. KH and KV are the permeabilities with horizontal and vertical saturation

Forage	Cote forage (m/sol)	Cote équivalente EST205 (m/sol)	Technique de mesures	K interprétée (m/s)	Laboratoire (*)
MSE101	537,02	449,62	essai hydrique	$KV = 3,78 \times 10^{-14}$	a)
	524,25	439,56	essai hydrique	$KV = 2,80 \times 10^{-14}$	a)
	542,98	454,31	essai hydrique	$KV = 2,79 \times 10^{-14}$	a)
HTM102	352,70	426,72	essai hydrique	$KV = 9,76 \times 10^{-15}$	a)
	358,70	432,03	essai hydrique	$KV = 1,92 \times 10^{-14}$	a)
	387,00	458,59	essai hydrique	$KV = 2,72 \times 10^{-14}$	a)
	397,90	469,96	essai hydrique	$KV = 3,25 \times 10^{-14}$	a)
	426,40	497,06	essai hydrique	$KV = 2,32 \times 10^{-14}$	a)
	451,79	523,77	essai hydrique	$KV = 2,07 \times 10^{-14}$	a)
	464,40	541,91	essai hydrique	$KV = 3,79 \times 10^{-14}$	a)
EST104	429,41	424,70	perméation	$KV = 3,29 \times 10^{-14}$ $KH = 1,42 \times 10^{-14}$	b)
	425,60	421,01	essai triaxial	$KV < 1,0 \times 10^{-13}$	c)
	425,72	421,12		$1,0 \times 10^{-14} < KH < 1,0 \times 10^{-13}$	c)
	456,38	452,24	perméation	$KV = 4,7 \times 10^{-15}$ $KH = 1,2 \times 10^{-14}$	b)
	447,75	442,87	essai triaxial	$1,5 \times 10^{-13} < KV < 3,0 \times 10^{-13}$	d)
	474,53	470,48	perméation	$2,43 \times 10^{-16} < K < 1,41 \times 10^{-15}$	b)
	463,22	458,89	essai triaxial	$2,0 \times 10^{-15} < KV < 2,0 \times 10^{-13}$	c)
	492,70	488,27	perméation	$KV = 1,84 \times 10^{-14}$ $KH = 1,23 \times 10^{-14}$	b)
	496,17	491,65	essai triaxial	$1,0 \times 10^{-14} < KV < 2,2 \times 10^{-13}$	e)
	496,60	492,07		$6,0 \times 10^{-14} < KV < 3,8 \times 10^{-13}$	e)
	497,92	493,36		$1,1 \times 10^{-13} < KV < 1,2 \times 10^{-12}$	e)
	500,82	496,18		$2,0 \times 10^{-13} < KV < 9,0 \times 10^{-13}$	e)
	524,26	519,07	perméation	$KV = 1,26 \times 10^{-14}$ $KH = 1,25 \times 10^{-14}$	b)
	EST204	453,80	453,80	essai triaxial	$1,0 \times 10^{-13} < KV < 4,0 \times 10^{-13}$
EST205		454,38	injection d'azote	$KV = 2,0 \times 10^{-14}$ $9,1 \times 10^{-15} < KH < 7,6 \times 10^{-13}$	g)
		451,15	essai triaxial	$1,0 \times 10^{-13} < KH < 2,0 \times 10^{-13}$	f)
		462,95	essai triaxial	$1,0 \times 10^{-13} < KV < 4,0 \times 10^{-13}$ $KH < 8,0 \times 10^{-13}$	d)
		473,84		$1,0 \times 10^{-14} < KV < 1,5 \times 10^{-12}$ $2,0 \times 10^{-14} < KH < 5,0 \times 10^{-14}$	f)
		505,65	injection d'azote	$KV = 9,3 \times 10^{-15}$	g)
		505,35		$KV = 6,7 \times 10^{-15}$	g)
		485,71	essai triaxial	$KV = 1,0 \times 10^{-13}$ $5,0 \times 10^{-13} < KH < 1,0 \times 10^{-12}$	f)
		490,83 502,58		$KV = 1,0 \times 10^{-13}$ $2,0 \times 10^{-14} < KV < 4,2 \times 10^{-14}$ $8,0 \times 10^{-13} < KH < 1,3 \times 10^{-12}$	f) f) d)
EST207	423,80	420,39	essai hydrique	$1,1 \times 10^{-13} < KV < 2,8 \times 10^{-13}$	d)
	469,03	459,62	essai hydrique	$5,0 \times 10^{-14} < KV < 2,2 \times 10^{-13}$ $1,1 \times 10^{-13} < KH < 2,8 \times 10^{-13}$	d) d)
	515,87	512,46	essai hydrique	$1,9 \times 10^{-13} < KV < 2,9 \times 10^{-13}$	d)
EST212	463,50	465,70	essai hydrique	$6,3 \times 10^{-14} < KV < 8,3 \times 10^{-14}$	d)
	495,68	497,88	essai hydrique	$8,1 \times 10^{-14} < KV < 2,1 \times 10^{-13}$	d)
	532,18	534,38	essai hydrique	$7,3 \times 10^{-14} < KV < 3,9 \times 10^{-13}$	d)

(*) Mesure réalisée par: a) EUROGROMAT, b) CEA, c) G3S, d) LAEGO, e) Antea, f) LMS, g) GRS.

Sur les neuf échantillons ayant fait l'objet d'une mesure de perméabilité perpendiculairement et parallèlement au plan stratigraphique (estimation respectivement de KV et KH), huit échantillons fournissent des valeurs du même ordre de grandeur pour les perméabilités verticales et horizontales ; seul un échantillon dans la partie la plus argileuse du Callovo-Oxfordien (502,58 m du forage EST205) fournit des estimations différant de plus d'un ordre de grandeur. Ces mesures ne mettent pas en évidence une anisotropie significative entre la perméabilité horizontale et verticale.

En ce qui concerne les coefficients d'emmagasinement spécifique des argilites, seuls les chocs hydrauliques sur éprouvettes sous chargement triaxial ont permis de les quantifier. Ils donnent des valeurs comprises entre 10^{-7} et 10^{-4} m^{-1} (75% des essais entre 10^{-6} et $3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$), avec une valeur médiane de $2 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$. La fourchette d'incertitude est sans doute supérieure à 50%, car les limites de la technologie actuelle sont atteintes. Cependant, cette valeur peut être rapprochée de celles évaluées à partir des modules de Biot mesurés sur échantillons également [24], à savoir 4×10^{-7} à $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, et des valeurs utilisées dans la modélisation des tests in situ, proches de 10^{-6} m^{-1} .

5. Résultats des tests entre obturateurs en forage profond

5.1. Analyse des tests réalisés dans les forages profonds

La démarche d'analyse des tests entre obturateurs a été :

- de mener, dans un premier temps, une interprétation en utilisant un modèle conceptuel comportant une zone interne décomprimée par le forage lui-même et une zone externe représentant la roche intacte et en réalisant le calage des courbes au mieux, sans tenir compte des connaissances acquises sur les charges stabilisées ;
- de reprendre, dans un deuxième temps, les analyses de certains tests, en considérant les valeurs de charge issues des suivis long terme et en évaluant les incertitudes liées aux effets thermiques et mécaniques ;
- de comparer les différentes approches pour évaluer la robustesse des estimations.

Parallèlement, les effets des fluides de tests ont été abordés au travers d'essais réalisés sur un même niveau avec une boue polymère, une boue à l'huile, ainsi

qu'avec du gazole. Il apparaît que les résultats obtenus quel que soit le fluide de test sont identiques, le facteur principal influençant les tests étant la stabilité de l'ouvrage, qui est moins bonne avec les boues à base de polymères dans les niveaux les plus argileux.

Les résultats des essais effectués en forages profonds depuis la surface et en forages courts depuis les galeries d'expérimentation sont confrontés aux résultats sur les échantillons. Ces résultats sont éventuellement réévalués en fonction des dernières valeurs stabilisées sur les charges « long terme ».

Cette confrontation entre les résultats de tests à court terme obtenus dans de multiples conditions de tests, avec des interprétations de chroniques acquises sur de longues périodes ou bien sur échantillons, permet d'obtenir des valeurs de perméabilité avec un bon degré de confiance.

L'analyse a été menée sur l'ensemble des tests, en considérant un modèle conceptuel comportant une zone radiale décomprimée et une zone saine. Cette approche est fondée, d'une part sur l'observation des carottes, qui fait apparaître une zone décomprimée centimétrique, et d'autre part sur l'analyse fine des mesures hydrauliques.

Les valeurs de charges obtenues sur l'interprétation des phases de récupération de pression statique sont très variables, en raison des conditions non idéales des tests.

À partir des valeurs obtenues, des analyses de sensibilité sont menées, en considérant des marges de variation sur les paramètres de calage et en testant la robustesse des résultats.

Une analyse approfondie a été menée sur trois tests à partir des forages profonds. L'analyse consiste, en premier lieu, en l'examen simultané de la première phase de récupération de pression statique et du premier choc hydraulique. En effet, les conditions de charges n'étant pas stables, une interprétation « normalisée » par une charge initiale n'est pas appropriée pour cette analyse approfondie. Les effets de température et d'historique de puits sont pris en compte à ce stade.

Le modèle conceptuel choisi dans cette étude est très simple : une zone homogène, avec effet de *skin* représentant la zone endommagée. Cette approche est préférée, car les paramètres d'écoulement proposés dans l'interprétation initiale (double zone) ne peuvent pas être déterminés de façon unique.

Finalement, la pression statique est contrainte par les valeurs mesurées ou estimées par les équipements EPG (*Electromagnetic Pressure Gauge*).

Enfin, des analyses de sensibilité sont menées sur les paramètres, pour estimer leur intervalle de confiance à 95%. Deux types d'analyses de sensibilité ont été réalisés : le premier type a consisté à tester la sensibi-

Tableau 2

Valeurs de référence retenues pour les perméabilités des argillites et plage de variation

Table 2

Reference values accounted for the permeabilities in argillites and variation range

Forage	Technique de mesure*	Intervalles mesurés (profondeur m/sol)	Perméabilité (m s ⁻¹)		
			Borne inférieure	Valeur de référence	Borne supérieure
EST107	EPG	409,0–425,0	$3,0 \times 10^{-14}$	$3,8 \times 10^{-14}$	$7,0 \times 10^{-14}$
EST103	EPG	428,0–453,0	–	4×10^{-13}	–
EST207	WB10	418,2–425,0	2×10^{-14}	1×10^{-13}	3×10^{-13}
EST207	WB9	426,0–429,5	4×10^{-14}	7×10^{-14}	1×10^{-13}
EST207	WB8	430,5–439,3	5×10^{-14}	6×10^{-13}	8×10^{-13}
EST207	WB7	440,3–448,9	5×10^{-14}	7×10^{-13}	9×10^{-13}
EST207	WB3–6	449,9–555,3	5×10^{-15}	9×10^{-15}	2×10^{-14}
EST212	EPG-1	487,5–498,3	$5,1 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$3,0 \times 10^{-13}$
	EPG-2	524,8–535,6	$5,5 \times 10^{-14}$	$6,0 \times 10^{-14}$	$6,5 \times 10^{-14}$
EST211	EPG	419,3–422,8	$8,0 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-14}$
	pk1	525,6–543,4	$1,3 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-12}$
	pk2	422,7–429,1	$7,0 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-13}$
	pk3	429,3–435,5	$6,6 \times 10^{-14}$	$2,4 \times 10^{-13}$	$6,0 \times 10^{-13}$
	pk4	446,2–452,3	$9,6 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-13}$	$4,8 \times 10^{-13}$
	pk5	476,9–484,2	$1,2 \times 10^{-14}$	$3,0 \times 10^{-14}$	$5,8 \times 10^{-14}$
	pk6	494,9–502,1	$2,2 \times 10^{-13}$	$4,8 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-12}$
	pk7	509,4–516,8	$1,7 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-13}$	$8,5 \times 10^{-13}$
EST363	pk8	459,9–466,5	$1,0 \times 10^{-13}$	$2,2 \times 10^{-13}$	$5,9 \times 10^{-13}$
		513,2–535,0	$6,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-13}$
MSE101	pk5	540,0–661,0	$3,4 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,4 \times 10^{-12}$
	pk6	612,0–647,0	$2,5 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-12}$
	pk7	379,5–400,0	$2,8 \times 10^{-13}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-12}$
	pk8	545,0–586,5	$2,3 \times 10^{-13}$	$3,9 \times 10^{-13}$	$1,2 \times 10^{-11}$
HTM102	pk3	365,5–386,7	$2,3 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-13}$	$2,4 \times 10^{-13}$
	pk4	344,4–365,5	$5,7 \times 10^{-13}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$8,6 \times 10^{-13}$
	pk7	379,5–400,0	$8,6 \times 10^{-14}$	$1,3 \times 10^{-13}$	$2,4 \times 10^{-13}$
	pk8	400,0–505,3	$6,4 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$9,0 \times 10^{-13}$

* Les différentes techniques utilisées [+ n° de test]:

- EPG: sonde de pression à transmission électromagnétique (*Electromagnetic Pressure Gauge*);
- WB: systèmes multi-obturateurs;
- pk: obturateurs simples.

lité de l'estimation des débits de production au cours des phases de récupération de la pression statique et au cours des *pulses* en rabattement; le deuxième type a consisté à comparer les différences entre un modèle d'écoulement à deux zones par rapport au modèle à une zone avec effet de *skin*.

5.2. Perméabilité à l'échelle du secteur et du site à partir des forages profonds

Le Tableau 2 présente les valeurs de référence et les plages de variation des perméabilités obtenues à partir des forages profonds, retenues pour le Callovo-Oxfordien. Ce sont les estimations pour les deux campagnes de tests entre obturateurs réalisées en 1994/1996 et 2003/2004, et pour les chroniques de pression à long

terme. Les valeurs de référence sont les valeurs de calage des courbes, tenant compte des valeurs de compressibilité mesurées lors du test. Le calage correspond au jeu de paramètres permettant le meilleur ajustement des courbes.

La Fig. 2 présente l'ensemble des valeurs de perméabilité estimées pour le site. Au stade actuel des interprétations, une mise en cohérence des résultats représentatifs pour le site peut être esquissée pour le Callovo-Oxfordien, par comparaison :

- des perméabilités déterminées selon différentes techniques à des profondeurs voisines à partir de forages différents ;
- des perméabilités déduites des récupérations de pression dans les dispositifs de suivi à long terme

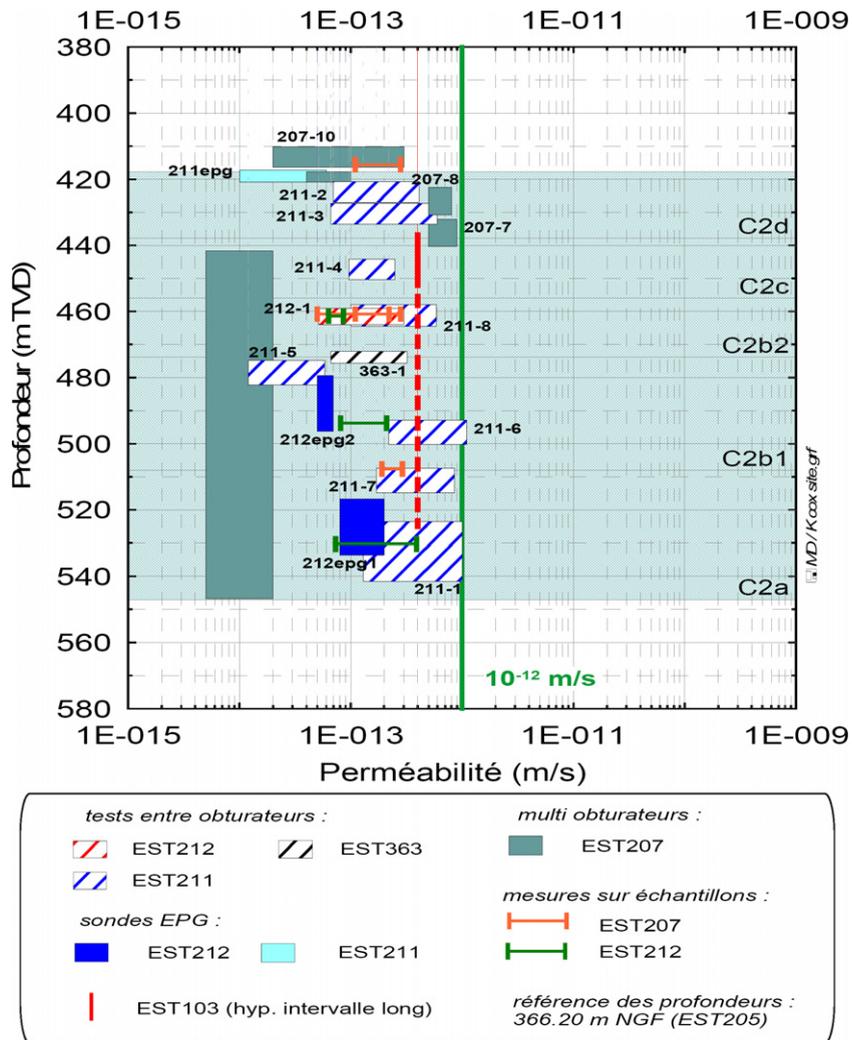


Fig. 2. Perméabilités estimées par divers moyens pour les argilites sur le site du laboratoire. Les tests sont repérés par le numéro du forage suivi de celui du test (211-1) (TVD : True Vertical Depth).

Fig. 2. Estimated permeability obtained through various means. Tests are listed with the borehole number followed by the test number (TVD: True Vertical Depth).

(sondes EPG et multi-obturbateurs WestBay – WB) et des tests entre obturbateurs (ou *pak* – pk), à des profondeurs voisines, à partir d'un même forage ;

- des perméabilités mesurées sur échantillons, pour le forage EST212.

Finalement, deux grands types d'approches de la conductivité hydraulique in situ ont été mis en œuvre sur le site de Bure (tests à court terme et chroniques de pression à long terme), dans différents contextes (inclinaison du forage, nature du fluide, longueur de chambre) représentant un nombre important de mesures (10 tests entre obturbateurs (pk), 4 sondes EPG, 1 système multi-obturbateurs – WB). La cohérence de l'ensemble des

perméabilités estimées permet d'établir une gamme de variation de ce paramètre pour les argilites du Callovo-Oxfordien, comprises entre 10^{-14} et 10^{-12} m s^{-1} pour le site de Bure. La valeur à 10^{-11} m s^{-1} a été obtenue dans une chambre sous simple obturbateur, dans des conditions de forage très dégradées. Elle correspond à une valeur de perméabilité dans une zone décomprimée.

6. Tests réalisés dans le laboratoire souterrain

6.1. Méthodologie mise en œuvre

Le concept expérimental mis en œuvre dans les galeries du laboratoire souterrain comporte les volets suivants :

- réalisation de forages carottés à l'air, répartis sur l'ensemble des lithofaciès ;
- analyse structurale des carottes ;
- réalisation de diagraphies géophysiques sur forages ;
- réalisation d'essais hydrauliques en système multi-obturbateurs et suivi permanent de l'évolution des pressions interstitielles ;
- réalisation de tests d'interférence entre forages voisins ;
- essais de laboratoire sur échantillons.

Ces mesures ont été réalisées à partir de la galerie 445 m et sont en cours au niveau principal du laboratoire 490 m.

Le programme et les dispositifs s'appuient sur le retour d'expérience obtenu à partir des expérimentations à caractère hydrogéologique, menées dans le laboratoire souterrain du mont Terri entre 1996 et 2000. Ces essais ont procuré un retour d'expérience sur les sujets suivants :

- caractérisation des équipements multi-obturbateurs et des fluides de test utilisés ;
- fiabilité des équipements de mesures ;
- types de tests hydrauliques et au gaz, durée et séquences de test ;
- interprétation des mesures en termes de paramètres hydrauliques ;
- contraintes techniques : détérioration des parois de forage par l'effet conjugué des contraintes naturelles, de l'humidification du forage et du gonflement des obturbateurs.

La stabilité des forages a très souvent présenté un handicap sérieux pour un accès renouvelé aux forages. La chance de réutilisation d'un forage diminue avec la durée d'une première expérimentation. Le retrait du train de test ainsi que le scellement correct d'un nouveau système ne sont pas garantis. De plus, selon son orientation par rapport à la stratification et aux contraintes naturelles, la stabilité du forage à court terme peut être problématique, particulièrement si les boues à phase aqueuse sont utilisées. Les forages à meilleure tenue mécanique ont été systématiquement ceux qui ont été forés à l'air. Cette dernière technique a systématiquement été retenue pour les forages dans les galeries du laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

Les équipements qui ont été utilisés au mont Terri étaient de deux types :

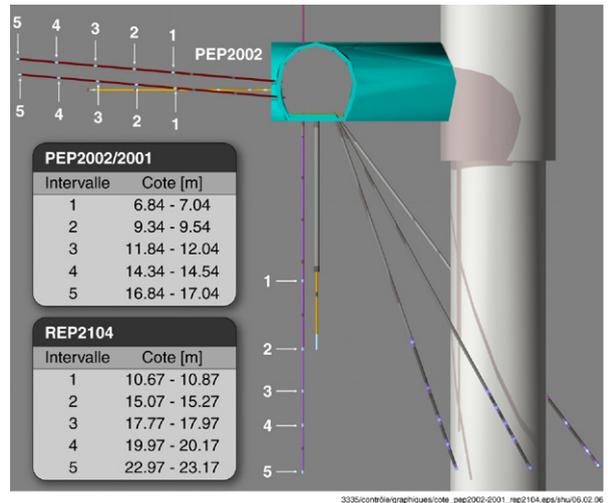


Fig. 3. Exemple de forages et d'intervalles de mesures qui ont été réalisés dans la galerie du laboratoire souterrain à 445 m. L'échelle est donnée par le diamètre du puits : 5 m.

Fig. 3. Example of layout of boreholes and tests intervals in the drift 445 m. Scale is given by the shaft diameter: 5 m.

- « classique amovible » : doubles obturbateurs, triples à sextuples ;
- « scellement définitif » : l'espace annulaire est limité par les obturbateurs. Pour certains types d'équipements, l'espace annulaire situé entre le mandrin et la paroi du forage est rempli de résine. De plus, la chambre de test comporte un filtre en acier fritté (équipement MMPS).

Afin de pouvoir réaliser des mesures sur plusieurs mois, l'emploi du type « scellement définitif » a généralement été utilisé dans les expérimentations réalisées au niveau 490 m du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

La Fig. 3 présente un exemple de forages et d'intervalles de mesures qui ont été réalisés dans la galerie 445 m du laboratoire souterrain.

6.2. Analyse des tests dans les forages des galeries du laboratoire souterrain

La démarche d'analyse des tests dans les forages courts effectués dans les galeries d'expérimentation est comparable à celle adoptée pour les forages profonds. Une analyse préliminaire permet d'obtenir une première estimation du modèle d'écoulement, c'est-à-dire la définition géométrique des zones internes et externes de la chambre de mesure, et des propriétés hydrauliques de la formation, sur la base des tests les plus représentatifs. L'analyse de détail permet ensuite d'évaluer les

Tableau 3

Estimations de la perméabilité dans le forage PEP2001

Table 3

Estimations of permeability in PEP2001 borehole

Chambre	Cote (m/sol)	Perméabilité (m s^{-1})		
		Min.	Calage	Max.
1	446,47–446,55	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,7 \times 10^{-14}$	$3,0 \times 10^{-14}$
2	446,66–446,75	$3,0 \times 10^{-14}$	$4,6 \times 10^{-14}$	$7,0 \times 10^{-14}$
3	446,86–446,94	$9,0 \times 10^{-14}$	$9,3 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-13}$
4	447,05–447,13	$5,0 \times 10^{-14}$	$5,9 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-13}$
5	447,24–447,29	$8,0 \times 10^{-14}$	$9,5 \times 10^{-14}$	$3,0 \times 10^{-13}$

Tableau 4

Estimations de la perméabilité dans le forage PEP2002

Table 4

Estimations of permeability in PEP2002 borehole

Chambre	Cote (m/sol)	Perméabilité (m s^{-1})		
		Min.	Calage	Max.
1	445,33–445,41	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-14}$
2	445,57–445,65	$5,0 \times 10^{-14}$	$9,8 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-13}$
3	445,74–445,82	$2,0 \times 10^{-14}$	$3,7 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-14}$
4	445,90–445,98	$5,0 \times 10^{-14}$	$6,5 \times 10^{-14}$	$8,0 \times 10^{-14}$
5	446,07–446,15	$9,0 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$3,0 \times 10^{-13}$

phénomènes perturbateurs, précise les valeurs de référence pour la perméabilité et la charge hydraulique et enfin évalue la sensibilité et l'incertitude (intervalle de confiance de 95%) des résultats. Le détail de la méthodologie, des analyses et interprétations est présenté dans le document [1].

6.2.1. Perméabilités obtenues dans les forages des galeries du laboratoire souterrain

À la fin 2004 et au début 2005, des tests ont été réalisés dans les quarante-huit chambres de mesures disponibles dans la galerie du laboratoire souterrain située à 445 m. Les valeurs présentées correspondent aux tests effectués pendant cette période ; D'autres tests effectués ultérieurement dans les galeries 445 et 490 m sont en cours d'interprétation.

Les valeurs de perméabilité obtenues sont comprises également entre 10^{-14} et 10^{-12} m/s, avec une prédominance de valeurs inférieures à 3×10^{-13} m s^{-1} . Il semble que les perméabilités horizontales soient dans la même gamme de valeur que les perméabilités verticales et, au stade actuel des analyses, aucune anisotropie n'a été mise en évidence. Cette observation est cohérente avec les observations géologiques, dans la mesure où le litage sédimentaire n'est pas observable à l'échelle d'une chambre de test.

Les Tableaux 3–5 présentent les valeurs de perméabilité obtenues dans les forages analysés [8].

Tableau 5

Estimations de la perméabilité dans le forage PEP2004

Table 5

Estimations of permeability in PEP2004 borehole

Chambre	Cote (m/sol)	Perméabilité (m s^{-1})		
		Min.	Calage	Max.
1	457,53–457,73	$4,0 \times 10^{-14}$	$5,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-13}$
2	461,93–462,13	$9,0 \times 10^{-14}$	$1,4 \times 10^{-13}$	$2,0 \times 10^{-13}$
3	464,63–464,83	$6,0 \times 10^{-14}$	$8,2 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-13}$
4	466,63–467,03	$2,0 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-13}$	$6,0 \times 10^{-13}$
5	469,83–470,03	$1,0 \times 10^{-13}$	$1,7 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-13}$

La Fig. 4 place les dernières mesures acquises au regard des connaissances à l'échelle du site. On constate une remarquable convergence entre les données acquises sur des chambres très longues (plusieurs mètres à dizaines de mètres) et les chambres très courtes (20 cm). Ceci confirme l'absence de structures tectoniques ou sédimentaires significatives, à l'échelle des chambres de mesures, au sein de cette formation et sa remarquable homogénéité d'ensemble.

7. Conclusion – Bilan des mesures de perméabilité réalisées sur les argilites du Callovo-Oxfordien

Les moyens utilisés par l'Andra depuis 1994 pour déterminer les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien ont montré leur robustesse en matière de complémentarité des méthodes et de leur mise en œuvre, ainsi qu'au niveau de la cohérence des résultats obtenus.

Finalement, quatre méthodes distinctes contribuent de manière essentielle à la détermination des perméabilités dans l'argilite du Callovo-Oxfordien :

- deux investigations *in situ* : tests hydrauliques de courte durée et chronique de pression-température de longue durée en chambres fermées (sondes EPG, équipements Westbay et MMPS) ;
- deux types de mesures en laboratoire sur échantillons : évolution des profils d'imbibition et tests hydrauliques en régime transitoire ou permanent sous conditions de contraintes triaxiales.

Les investigations *in situ* dans les forages profonds testent des hauteurs importantes (métrique ou décamétrique) permettant d'accéder aux propriétés « moyennes » du milieu selon un plan horizontal, globalement parallèle à la stratigraphie (elles peuvent cependant refléter des zones plus perméables, éventuellement peu épaisses). Ainsi, la longueur cumulée des huit chambres de tests dans le forage EST211 couvre 44% de l'épais-

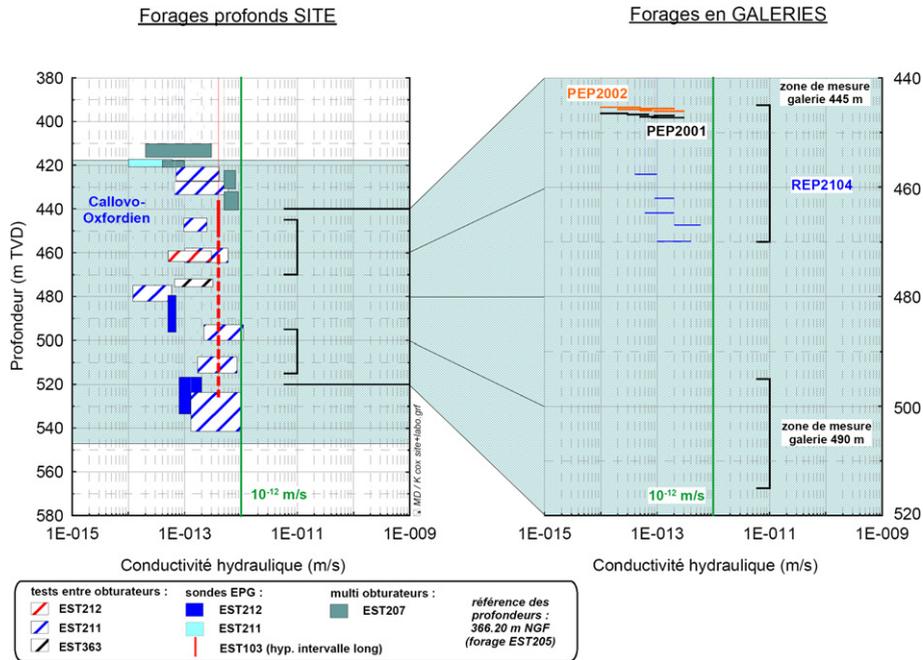


Fig. 4. Comparaison des mesures de perméabilité entre les forages profonds du site et les forages en galerie à 445 m (TVD : True Vertical Depth).
 Fig. 4. Comparison of permeability measurements from deep boreholes and boreholes in the drift at 445 m (TVD: True Vertical Depth).

seur des argilites. Ce type de test permet de s’assurer qu’il n’existe pas de zone ou de structure de plus forte perméabilité. De manière complémentaire, les investigations in situ dans les galeries d’expérimentation du laboratoire souterrain permettent d’accéder à la perméabilité horizontale et verticale des argilites à une échelle plus locale (chambres décimétriques). Les mesures en laboratoire sur échantillons ne testent qu’une hauteur faible (inférieure à 0,1 m). Elles ont été, dans leur majorité, réalisées pour déterminer la perméabilité horizontale.

Les investigations in situ présentent le grand avantage d’être réalisées dans des conditions mécaniques et hydrauliques relativement proches des conditions naturelles, mais difficiles à contrôler.

Malgré les problèmes liés au prélèvement et au conditionnement, les mesures en laboratoire sur échantillons permettent de maîtriser l’environnement physique et les contraintes appliquées, et de balayer ainsi une vaste gamme de conditions représentatives du milieu.

Si on ne retient que les valeurs considérées comme fiables, tant pour les mesures in situ que pour les mesures sur échantillons, il apparaît une représentation cohérente et homogène de la perméabilité des différentes unités litho-sédimentaires (Fig. 5).

La perméabilité de la formation du Callovo-Oxfordien est comprise entre 10^{-14} et 10^{-12} m s^{-1} . L’in-

fluence de la lithologie est peu marquée : l’horizon plus carbonaté à la base de l’horizon C2d présente des perméabilités légèrement plus élevées (3×10^{-13} à 1×10^{-12} m s^{-1}), l’horizon C2b, qui a le taux de carbonate le plus bas de la formation, en moyenne 21,5%, et le passage de l’horizon C2d à l’Oxfordien calcaire (C3a) se caractérisent, dans l’ensemble, par des perméabilités légèrement plus basses (10^{-14} à 10^{-13} m s^{-1}).

Il n’apparaît pas d’effet d’échelle réellement perceptible. La perméabilité mesurée par les investigations in situ est du même ordre de grandeur que les mesures de laboratoire sur échantillons, même si les valeurs obtenues avec ces derniers sont plus dispersées. Au stade actuel, aucune anisotropie significative n’a pu être mise en évidence.

Les valeurs de perméabilité mesurées dans les argilites du Callovo-Oxfordien sont concordantes avec celles données dans la littérature pour des formations argileuses. Ainsi, la perméabilité des Argiles à Opalinus (argiles aaléniennes du Jura suisse) est comprise entre 10^{-14} et 10^{-12} m s^{-1} [16], et celle de l’argilite toarciennne de Tournemire (Aveyron) entre 10^{-13} et 10^{-11} m s^{-1} [3].

Les campagnes de tests de perméabilité dans les galeries se poursuivent, des résultats complémentaires à 490 sont en cours d’interprétation, et les programmes futurs viseront à comprendre les phénomènes couplés hydromécaniques et hydrochimiques [6].

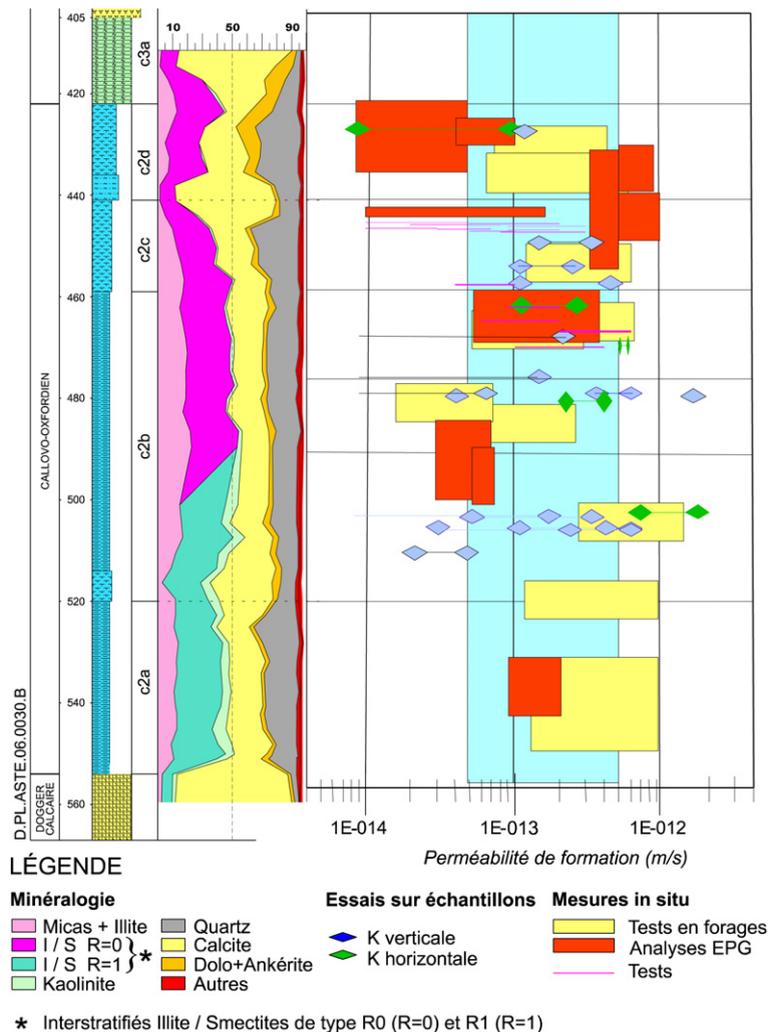


Fig. 5. Synthèse des données de perméabilités mesurées dans la formation du Callovo-Oxfordien.

Fig. 5. Synthesis diagram of all permeability measurements carried in the Callovo-Oxfordian argillaceous rocks.

Références

- [1] Andra, Résultats préliminaires des travaux réalisés dans la galerie à 445 m du puits principal – Expérimentation PEP – Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, dossier Andra n° D RP ADPE 05-0539, 2005.
- [2] Antéa, Projet HAVL Argile. Analyse des mesures de perméabilité réalisées sur échantillons et en forages dans l'argilite du Callovo-Oxfordien, rapport Andra n° D RP OANT 04-024.A, 2004.
- [3] J.-Y. Boisson, L. Bertrand, J.-F. Heitz, Y. Moreau-Le Golvan, In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France, *Hydrogeol. J.* 9 (2001) 108–123.
- [4] Castem 2000, Guide d'utilisation, CEA/DMT/LAMS; <http://www-cast3m.cea.fr/cast3m/html/ManuelCastemEnsta/>.
- [5] F. Cecconi, V. Chatelet, J. Delay, M. Cruchaudet, Monitoring abnormal pore pressures in low-permeability argillite using wireless transmission gauges, in: 66th EAGE Conference and Exhibition, Paris, 2004.
- [6] Colenco, Étude de dimensionnement de l'expérimentation PEP – Effet de l'osmose chimique sur les profils de pression, rapport Andra n° D.RP.OCPE 03-005, 2003.
- [7] Colenco Interprétation hydrogéologique des marées terrestres aux forages EST201, EST203 et EST104, rapport Andra n° D.RP.OCPE 04-019, 2004.
- [8] Colenco, Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Tests hydrogéologiques en forages d'expérimentation dans la niche. Expérimentation PEP, rapport Andra n° D.RP.OCPE. 05.010.A, 2005.
- [9] J. Croisé, L. Schlickenrieder, P. Marshall, J.-Y. Boisson, P. Vogel, S. Yamamoto, Hydrogeological investigations in a low-permeability claystone formation: the Mont Terri Rock Laboratory, *Phys. Chem. Earth* 29 (2004) 3–15.
- [10] V. De Greef, A. Giraud, K. Su, Mesures de la perméabilité des argilites saturées et non saturées. Bilan des études et travaux de l'Andra 2003, Andra, 2004, pp. 128–132 (247 – ISSN 1630-6635).

- [11] J. Delay, M. Cruchaudet, Hydraulic monitoring of low-permeability argillite at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, in: R. Hack, R. Azzam, R. Charlier (Eds.), *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, in: *Lect. Notes Earth Sci.*, vol. 104, 2004, pp. 341–346.
- [12] J. Delay, M. Distinguin, Hydrogeological investigations in deep wells at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, in: R. Hack, R. Azzam, R. Charlier (Eds.), *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, in: *Lect. Notes Earth Sci.*, vol. 104, 2004, pp. 219–225.
- [13] G. De Marsily, *Hydrogéologie quantitative*, Masson, Paris, 1981, (215 p.).
- [14] Eurogéomat, *Caractéristiques hydrodynamiques de l'argile du Gard–Haute-Marne–Meuse*, rapport Andra n° B.RP.0EUG.95.004, 1995.
- [15] FORPRO Benchmark perméabilités : caractérisation des milieux de très faible perméabilité, rapport GdR FORPRO 2003/06, 2003.
- [16] A. Gautschi, Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): implications for deep geological disposal of radioactive wastes, *Hydrogeol. J.* 9 (2001) 97–107.
- [17] S. Horsemann et al., Water, gas and solute movement through argillaceous medias, Report CC-961/1, OCDE Publications, Paris, 1996, pp. 205–213.
- [18] P.A. Hsieh, J.V. Tracy, C.E. Neuzil, J.D. Bredehoeft, S.E. Silliman, A transient method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks – 1. Theory, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 18 (3) (1981) 245–252.
- [19] W. Klopff, A. Vinsot, J. Delay, Expanded Application of NMR well logs for poresize distribution and permeability in low-permeability argillites and carbonates, in: 66th EAGE Conference and Exhibition, Paris, 7–10 June 2004.
- [20] M. Koriche, *Caractérisation du comportement couplé des argillites de Meuse/Haute-Marne aux états saturés et partiellement saturés*, thèse de doctorat, INPL, Nancy, 2004.
- [21] Laego, *Essais sur échantillons pour le développement des modèles rhéologiques HM et THM des argillites*, rapport Andra n° C.RP.0ENG.02.05302003, 2003.
- [22] Laego, *Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Essais de perméabilité. Ouvrage EST207*, rapport Andra n° C.RP.0ENG.04.0300.A, 2005.
- [23] J.-M. Lavanchy, J. Croisé, E. Tauzin, G. Eilers, Hydraulic testing in low permeability formations. Test design, analysis procedure and tools. Application from site characterization programmes, in: *Proc. Int. conference on radioactive waste disposal*, Hambourg, Allemagne, 9–11 septembre 1998.
- [24] O. Ozanam, N. Hoteit, E. Bemer, J.-F. Heitz, Experimental determination of poroelastic parameters of a clayey rock, in: *Biot Conference, Proc. 2nd Biot Conf. on Poromechanics*, Grenoble, France, 2002.
- [25] A. Revil, P.W.J. Glover, Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones and clays, *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998) 691–694.
- [26] J.-C. Robinet, M. Rhattas, Détermination de la perméabilité non saturée des matériaux argileux à faible porosité, *Can. Geotech. J.* 32 (6) (1995) 1035–1043.
- [27] B. Yven, S. Sammartino, Y. Géraud, F. Homand, F. Villiéras, Mineralogy, texture and porosity of Callovo-Oxfordian argillites of the Meuse/Haute-Marne region (eastern Paris Basin), *Bull. Soc. geol. France* (sous presse).