

Optimisation hydrogéologique des fondations profondes Intérêt des essais au micromoulinet *Hydrogeological optimisation of foundations benefit of microflowmeter tests*

G. MONNIER

BURGEAP

27, rue de Vanves

92772 Boulogne-Billancourt France Cedex

g.monnier@burgeap.fr

Note technique

Résumé

Les optimisations techniques et, par conséquent, financières qui peuvent être réalisées sur des projets immobiliers font partie des préoccupations constantes des maîtres d'ouvrage. Certaines de ces optimisations dépendent de la parfaite maîtrise des eaux souterraines. Le présent article porte sur l'étude hydrogéologique réalisée dans le cadre de la construction du siège Télédiffusion de France (Paris 15^e), étude qui avait pour objectif d'optimiser la profondeur de la paroi moulée périmétrique au projet. C'est au cours des essais que nous est apparue la possibilité d'éviter la réalisation du fond injecté. Ces essais ont permis de localiser le toit de la craie compacte à des cotes comprises entre 4 et 7 NGF et d'évaluer la perméabilité verticale de ce matériau à quelques 10^{-6} m/s. Le débit résiduel attendu en phase chantier, sans injections, fut évalué à $14 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui est très faible pour un matériau tel que la craie réputée très perméable. De ce fait, la mise en place d'un fond injecté n'était plus nécessaire : le gain, en terme de diminution de débit, n'étant pas significatif eut donc été financièrement injustifié. Après réalisation de la seule paroi moulée (que les études permirent de raccourcir par rapport au projet initial), un essai de débit résiduel fut effectué en vraie grandeur au moyen de 4 puits de pompage et de 17 piézomètres. Pour un rabattement de 7,7 mètres, le débit global sur toute la fouille était de $7,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ce qui confirmait parfaitement l'ordre de grandeur du débit calculé d'après les micromoulinets. Le caractère peu perméable de la craie compacte, ainsi prouvé par les essais, lui faisait jouer le rôle de « fond injecté naturel ». L'abandon du fond injecté permit une économie d'environ 25 % sur le coût des structures profondes (paroi moulée 4 mètres plus courte et fond injecté évité ($3\,500 \text{ m}^2$ de surface et 3 mètres d'épaisseur)).

Mots-clés : eaux souterraines, hydrogéologie, fondations profondes, paroi moulée, fond injecté, injection, craie, craie compacte, perméabilité, débit résiduel, micromoulinet, essai de pompage.

Abstract

The technical and therefore financial optimisation that can be achieved on building projects is one of the financiers' major concerns. In that respect mastering the underground water perfectly can prove very important. The current article relates to the hydrogeological study carried out for the construction of the head offices of Télédiffusion de France in Paris (France), the scope of the study was to optimise the depth of the surrounding diaphragm walls. It was during tests that we saw the possibility to avoid implementing an injected ground. These tests allowed us to locate the depth of the compact chalk between the altitude of 4 and 7 meters ASL and to evaluate the vertical permeability of the chalk to about 10^{-6} m/s. The residual flow rate expected at the end of the construction works, without injected ground, was estimated to $14 \text{ m}^3/\text{h}$ which is very low considering a reputedly very permeable rock such as chalk. Thus, the implementation of injected grounds was not necessary. The further decrease in residual flow rate would not have been significant and therefore, further financial investment was considered unnecessary. Studies were also carried out which allowed us to make the surrounding diaphragm walls shorter than the original project. After the sole surrounding diaphragm walls was constructed, a real size flow rate measure was carried out by means of 4 pumping wells and 17 monitoring wells. The total flow rate was $7,3 \text{ m}^3/\text{h}$ with drawdown of the water table of 7,7 m, which perfectly confirmed the range of flow rate we calculated from the microflowmeter tests. The low permeability of compact chalk was thus proven by the tests, and the chalk could be used as a « natural injected ground ». Giving up the injected ground allowed to save about 25 % of the cost of the underground structures: the surrounding diaphragm walls was 4 m shorter than the original project and the injected ground ($3\,500 \text{ m}^2$) was not found to be necessary to be built.

Key words: ground water, hydrogeology, surrounding diaphragm walls, injected ground, injection, chalk, permeability, residual flow rate, microflowmeter test, pumping test.

NDLE : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 31 décembre 2002.

1. Introduction

Le projet initial du siège de Télédiffusion de France, 10, rue Oradour-sur-Glane à Paris (15^e), d'une surface totale au sol de 3500 m², comportait la réalisation de 4 niveaux de sous-sols descendus à la cote 18,4 NGF (dalage) pour un fond de fouille à 17,8 NGF (cf. Fig. 1). La nappe, à 25,5 NGF (en décembre 1995), impliquait un rabattement de nappe de 7,7 mètres. Les sous-sols devaient, à l'origine, être réalisés sous protection d'une paroi moulée à la cote -3 NGF et d'un fond injecté entre les cotes 0 et -3 NGF.

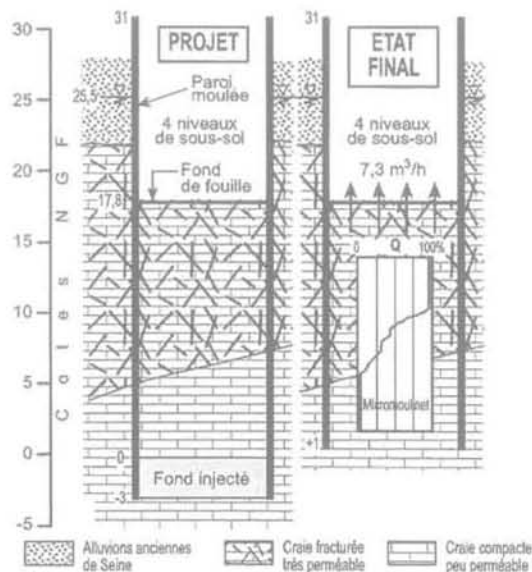


Figure 1 : PROJET ET ETAT FINAL

FIG. 1 Projet et état final.
Project and final state.

Le présent article décrit les essais hydrogéologiques réalisés sur le site et les optimisations qu'ils ont permis d'apporter au projet.

2. La géologie et hydrogéologie du site

Le siège TDF se trouve en bordure de la plaine alluviale de la Seine (cf. Fig. 2). Les formations géologiques rencontrées sont les suivantes (à partir du terrain naturel (= 32 NGF) vers le profondeur) : des remblais, des alluvions de Seine (modernes et anciennes) jusqu'à la cote 22 NGF reposant sur la craie campienne fracturée puis compacte (c'est-à-dire peu ou pas fracturée). Le toit de cette craie compacte, au droit du projet, n'était pas connu à l'origine de l'étude.

La figure 2 montre que le siège TDF se situe à proximité des formations tertiaires résiduelles suivantes, non érodées par la Seine (de bas en haut) : calcaire et marnes de Meudon, argile plastique, sables d'Auteuil, fausses glaises, calcaire grossier, marnes et caillasses, etc.

Au droit du siège TDF, la nappe s'équilibrait au sein des alluvions de Seine. En l'absence de pompages de débits significatifs dans l'aquifère crayeux dans les environs immédiats du site, la charge hydraulique de la nappe de la craie s'établissait approximativement à la même cote que la nappe des alluvions (25,50 NGF pour la nappe des alluvions et 25,41 NGF pour la nappe de la craie, lors de l'essai de débit résiduel effectué le 5 décembre 1995). Un pompage d'essai réalisé au droit du site dans des puits crépinés sur 10,4 mètres à la base de la craie a permis d'évaluer, au moyen de la méthode graphique de Theis, la transmissivité de cette formation à 9.10^{-3} m²/s et le coefficient d'emmagasinement à 0,3 pour mille (ce qui traduit le caractère captif de l'aquifère crayeux sous les alluvions anciennes de Seine litées).

3. Pourquoi la craie est-elle fracturée ?

Selon que l'on teste, au moyen de pompages d'essai, la craie à partir d'un sommet ou dans une vallée, il est classique de mesurer des différences très importantes de transmissivité, dans un rapport de 1 à 100 (10^{-4} à 10^{-2} m²/s). Cette variation tire son origine de

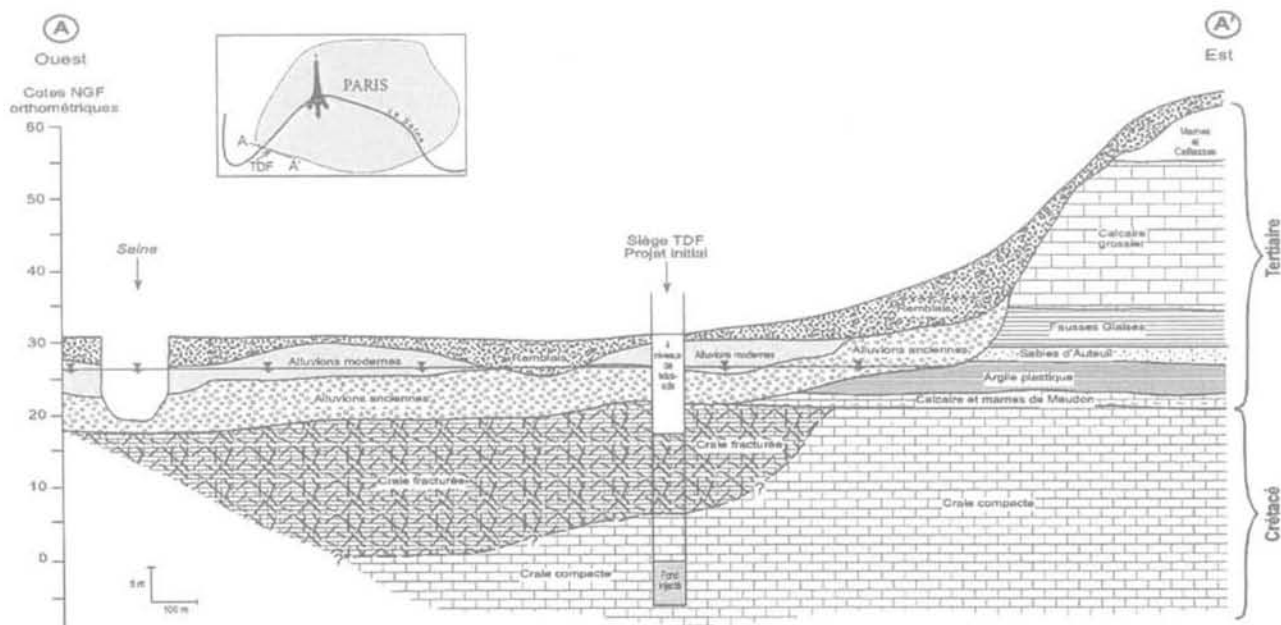


FIG. 2 Coupe géologique Ouest-Est passant par le siège TDF.
Geological section West-East going through the TDF head offices.

l'état de fracturation de la craie. L'épaisseur sur laquelle la craie est fracturée (ou diaclasée) est la résultante d'un certain nombre de phénomènes. Par ordre d'importance probable et sans entrer dans une quantification de l'influence des différents paramètres qui demanderait des études sortant du contexte du présent article, on citera :

3.1. La relaxation des contraintes à l'intérieur du massif crayeux

Comme nous l'avons indiqué précédemment, à l'est du projet, la topographie montre un relief correspondant aux formations tertiaires non érodées par la Seine : calcaire et marnes de Meudon, argile plastique, etc. jusqu'au calcaire de Saint-Ouen. Le toit de ces formations culmine vers 80 NGF au droit de la Cité universitaire. Au sud-ouest du site (Clamart, Meudon), des formations plus récentes encore (sables de Fontainebleau, meulière de Montmorency) sont observées et atteignent 170 NGF. A l'ouest du site, le Mont-Valérien (sables de Fontainebleau) est coté à 160 NGF environ. La Seine et ses crues, dont le cours a été contraint par des structures tectoniques (anticlinal de Meudon par exemple) et/ou par des variations latérales de faciès de certaines formations, ont donc joué le rôle d'un « gigantesque rabot ». Ainsi, au droit de la vallée de la Seine (vers 30 NGF), ce sont environ 130 mètres de terrain qui ont été érodés, c'est-à-dire, en retenant une masse volumique de $1,8 \text{ t/m}^3$, une diminution de pression de l'ordre de 230 tonnes/m^2 . Cette érosion a donc entraîné une relaxation des contraintes au sein du massif crayeux, créant une fracturation développée ensuite par dissolution.

3.2. La dissolution du matériau crayeux

Lorsque la fracturation se produit dans un matériau sous nappe, l'eau envahit ce début de porosité, y circule et l'accentue compte tenu du caractère légèrement acide de l'eau de pluie. Différents phénomènes peuvent accélérer la dissolution. On citera en particulier, la transformation oxydante des pyrites contenues dans la craie indiquée par C. Mégien (1979) dans la région de Gargenville (78). Ce même auteur mentionne par ailleurs que « l'augmentation des teneurs en gaz sulfureux (SO_2) – provenant de l'activité humaine (centrales thermiques, transport, usage domestique) – de l'atmosphère provoque une acidité qui se révèle

par une baisse du pH des eaux de pluies à l'échelle de l'Europe. [...] Pour la France, entre 1956 et 1966, sur sept stations rurales, le pH est passé de 5,1 à 4,6 ». Il apparaît donc que l'augmentation du pH de la pluie utile ne peut que concourir, sans doute dans une mesure relativement modeste compte tenu du caractère récent du phénomène (depuis le XIX^{e} siècle), à l'élargissement des diaclases de la craie.

3.3. Les variations de température (glaciation)

Les variations de température, en particulier lors des glaciations (quatre glaciations au Quaternaire) ont participé à l'augmentation de la fracturation (expansion de l'eau lors de la baisse de température ; phénomène dit de gélifraction des roches fissurées). Par ailleurs, les efforts mécaniques liés aux déplacements des glaciers sur les sols porteurs ont probablement participé à la fracturation des roches.

3.4. La fracturation tectonique

Enfin, les mouvements d'origine tectonique interviennent de façon importante dans la création de réseaux de fracturation à des échelles variant de la faille régionale à la microfissure.

En définitive, la fracturation d'un matériau rocheux résulte d'une évolution complexe qui fait appel à un certain nombre de facteurs parmi lesquels, la relaxation du massif rocheux, la dissolution, les contraintes tectoniques et les variations de température. Dans le cas du siège TDF, l'analyse du contexte géologique – en particulier la proximité du recouvrement tertiaire – portait à croire que l'épaisseur de craie fracturée serait sans doute limitée. Pour vérifier cette hypothèse, deux essais au micromoulinet de forage furent réalisés.

4. Le principe d'un essai au micromoulinet

Le micromoulinet – de rivière ou de forage – est un outil qui permet de mesurer des vitesses de courant d'eau, sur une section de rivière ou verticalement, dans un puits ou un piézomètre

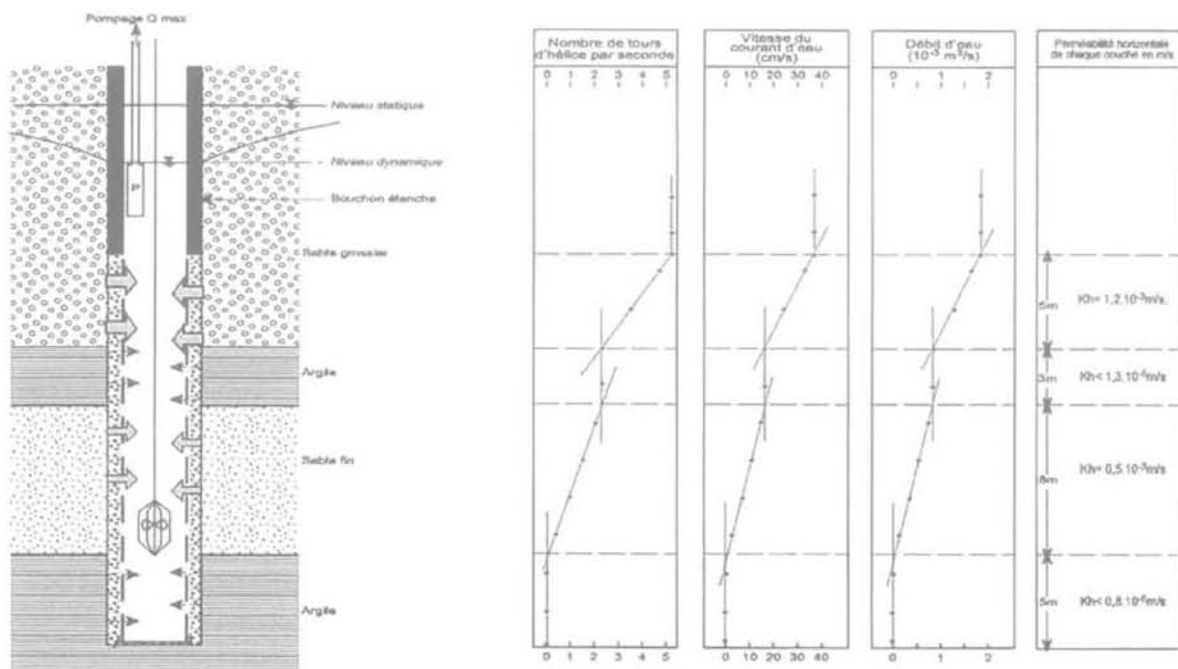
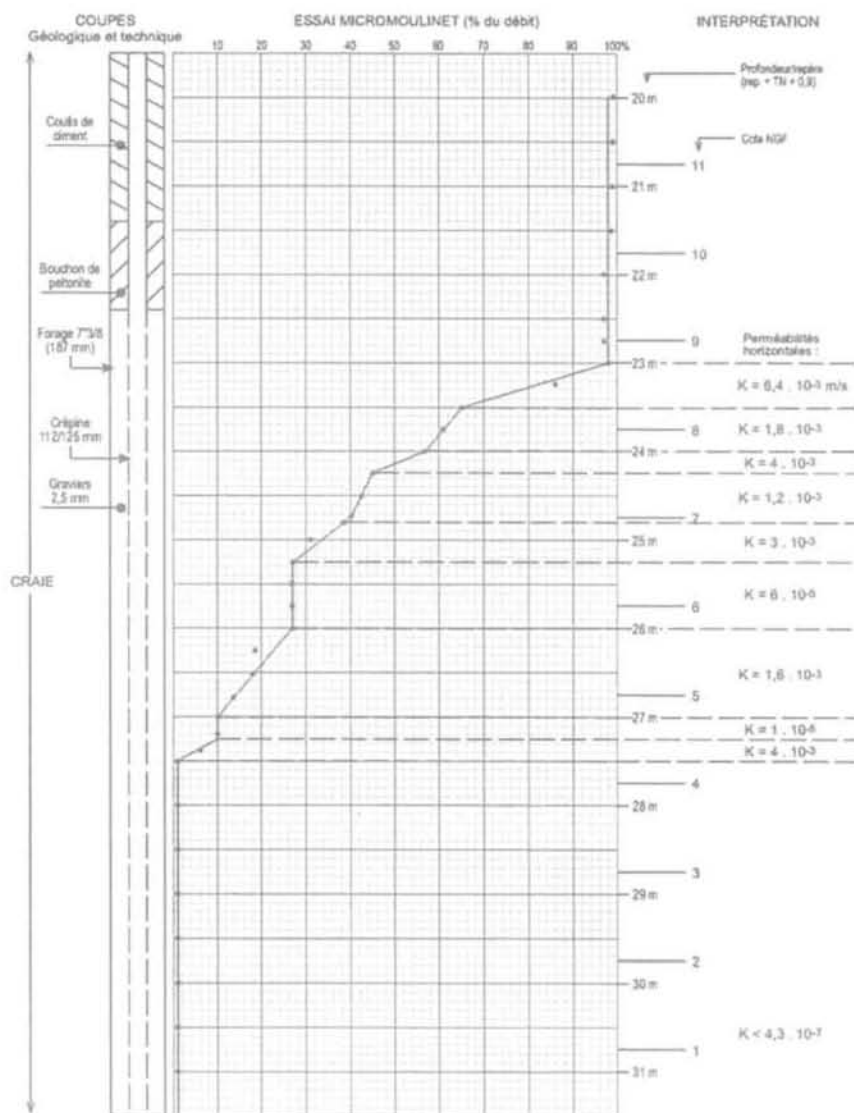


FIG. 3 Évaluation des perméabilités horizontales à partir d'un essai au micromoulinet. Evaluation of horizontal conductivities from a microflowmeter test.

FIG. 4 Un des deux essais au micromoulinet réalisés sur le site TDF.
One of the two microflowmeter tests done on the TDF site.



(cf. Fig. 3). Bien qu'il existe différents types d'appareil, le principe reste toujours le même. Dans le cas d'un puits, un écoulement ascendant (ou descendant, selon que la pompe est placée en haut ou en bas du puits) est créé par pompage¹. Le « profil de vitesse » dans le puits en pompage est mesuré au moyen du micromoulinet en le déplaçant selon un pas de mesure régulier. Connaissant le diamètre intérieur de l'ouvrage, le « profil de débit » se déduit du profil de vitesse.

Le pompage induit dans le puits, un rabattement, donc une différence de charge hydraulique entre l'intérieur du puits et l'extérieur (c'est-à-dire l'aquifère dans les environs immédiats du puits). Cette différence de charge est constante sur la verticale du puits. Les différentes couches traversées par le puits sont donc identiquement sollicitées² et produisent chacune un débit d'eau qui est uniquement fonction de la perméabilité horizontale de la couche (K_h) et de son épaisseur (e), c'est-à-dire de sa transmissivité (T = K_h · e). Comme on peut le constater sur la figure 3, plus la

couche est perméable, plus l'accroissement de la vitesse est rapide sur un segment considéré. *A contrario*, dans le cas de couches très peu perméables (argile, limons, craie compacte), la vitesse ne varie pas sur le segment considéré.

La transmissivité globale de la hauteur crépignée – mesurée lors d'un pompage d'essai indépendant de l'essai au micromoulinet – peut ensuite être « répartie » en une suite de transmissivités élémentaires (correspondant à chaque couche) au prorata du débit fourni par chaque couche. Les perméabilités horizontales sont ensuite évaluées en divisant les transmissivités élémentaires par l'épaisseur de chaque couche.

La figure 4 présente un des deux profils de débit réalisés sur le siège TDF. On constate l'absence de débit sous la cote approximative 4,2 NGF.

5. Les optimisations constructives apportées

Sur la base des perméabilités horizontales déduites des deux essais au micromoulinet, des perméabilités verticales équivalentes furent calculées pour chaque micromoulinet (en appliquant la formule développée par G. Schneebeli (1966) dans le cas des terrains stratifiés). Ensuite, des simulations visant à évaluer le débit résiduel furent réalisées, au moyen de la loi de Darcy et en considérant plusieurs hypothèses d'ancrage de paroi moulée, sans fond

¹ Un écoulement naturel (sans pompage) peut également (et éventuellement) être mesuré dans un puits (ou un piézomètre), lorsqu'il traverse plusieurs niveaux aquifères de charges hydrauliques différentes.

² On fait l'hypothèse que les charges hydrauliques des différentes couches traversées s'équilibrent aux mêmes cotes, ce qui dans le cas des puits de l'étude TDF, crépinés sur 10,4 mètres uniquement, était vrai.

injecté. Le débit résiduel attendu en phase chantier fut évalué à 14 m³/h pour 7,7 mètres de rabattement. Il apparut alors clairement que le projet pouvait être optimisé dans deux directions : suppression du fond injecté et diminution de la profondeur de la paroi moulée.

En définitive, la paroi moulée fut réalisée jusqu'à la cote +1 NGF (cf. fig. 1) et non pas -3 NGF comme initialement prévu. Cela représenta une économie d'environ 1 000 m² de paroi moulée (4 mètres de hauteur sur un périmètre de 240 mètres).

La paroi moulée une fois réalisée, un essai de débit résiduel, en vraie grandeur, permit de vérifier qu'effectivement la réalisation du fond injecté ne s'avérait pas nécessaire. Au bout de 7 jours, après désaturation des alluvions et stabilisation des rabattements, le débit résiduel mesuré était de 7,3 m³/h, ce qui est parfaitement cohérent avec l'évaluation du débit faite sur la base des essais au micromoulinet.

6. Conclusion

L'environnement hydrogéologique d'un projet immobilier peut être à l'origine d'optimisations techniques et donc, d'économie globale. Ces optimisations requièrent, en premier lieu, une connaissance approfondie du contexte géologique et hydrogé-

ologique, et nécessitent ensuite, la réalisation d'essais appropriés dans des ouvrages (puits et piézomètres) convenablement forés, dûment équipés, nettoyés et développés.

Dans le cadre de la construction du siège Télédiffusion de France à Paris (15^e), l'interprétation de deux essais au microulinet de forage a conduit à positionner précisément le toit de la craie compacte et « imperméable ». Ce niveau peu perméable ainsi repéré a donc été utilisé comme « fond injecté naturel » limitant le débit résiduel en fond de fouille.

L'économie du fond injecté prévu (3 500 m²) et la diminution de 4 mètres de la hauteur de la paroi moulée (1 000 m² de paroi supprimée) ont conduit à une économie de l'ordre de 25 % du coût des structures profondes initialement envisagées.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Lachowski (Télédiffusion de France) qui a autorisé la publication du présent article, M. Lucien Bourquet, à l'époque de l'étude Directeur technique au BURGEAP, pour ses conseils avisés, M. Jean Bussière et Mlle Marion Miglioretti pour le soin qu'ils ont apporté aux figures, ainsi que tous les techniciens et ingénieurs du BURGEAP qui m'ont fait profiter de leurs expériences théoriques et pratiques en matière d'essais d'eau.

Bibliographie

Foucault A. et Raoul J.F. – « Dictionnaire de géologie », Paris, Masson, 1980.
Meignen C. – « Hydrogéologie du centre du bassin de Paris ; contribution l'étude de quelques aquifères principaux », Thèse

de doctorat d'État, Mémoire du BRGM, n° 98, 1979.
Schoeller H. – « Les eaux souterraines », Paris, Masson, 1962.

Schneebeil G. – « Hydraulique souterraine ». Paris, Eyrolles, coll. du Centre de recherches et d'essais de Chatou, vol. 12, 1966.