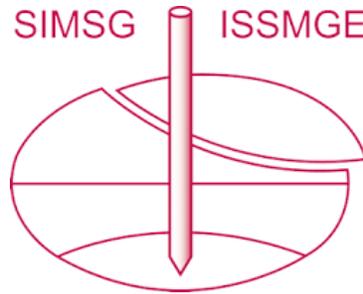


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Essais de Perméabilité In Situ à Niveau Variable

In Situ Variable Head Permeability Tests

R.P. CHAPUIS
J.J. PARÉ
J.G. LAVALLÉE

Mon-Ter-Val Inc, Montréal, Québec, Canada
S.E.B.J., Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ L'utilisation du diagramme des vitesses pour les essais de perméabilité à niveau variable permet de déterminer les niveaux piézométriques locaux et de reconstituer le mode d'écoulement des eaux souterraines. Cette méthode du diagramme des vitesses a été utilisée à titre expérimental sur différents sites des aménagements hydroélectriques de la Baie James, Québec, Canada. Mettant en relief les anomalies d'écoulement de l'eau injectée, elle a permis de préciser la valeur des essais avec un bon niveau de confiance, par l'élimination du risque d'erreur sur le niveau piézométrique estimé, ainsi que par une exploitation plus rationnelle des résultats, incluant une appréciation du "claquage hydraulique apparent" dans les sols granulaires.

INTRODUCTION

Au cours des investigations sur des sites de digues et barrages, des essais de perméabilité sont couramment effectués dans les forages. Les essais à niveau constant paraissent faciles à interpréter, d'autant plus qu'on ne mesure généralement qu'un seul débit correspondant à une seule colonne d'eau. Par contre, l'interprétation des essais de perméabilité à niveau variable (PNV) est plus délicate: les mesures, censées fournir une relation linéaire d'après les formules usuelles, donnent fréquemment des courbes, ce qui pose "le problème (Rat et al, 1970) de la mise au point d'une méthode d'interprétation".

Ainsi, quoique la théorie des essais de perméabilité soit bien établie (Horvslev, 1951), l'opinion courante estime que la confiance en ces essais est limitée (Can. Found. Eng. Manual, 1978), à cause des difficultés d'exécution et d'interprétation (Milligan, 1975). En fait, même avec des conditions d'exécution très bien contrôlées, il existe des causes d'erreurs possibles dont certaines ont été étudiées par Horvslev (1951), Gibson (1966), Weber (1968) ainsi que par Bjerrum et al (1972). Ces causes d'erreurs citées dans les références sont: (a) les fuites par les joints ou au contact sol-tubage; (b) le claquage hydraulique du sol; (c) le remaniement du sol pendant le battage et le lavage; (d) le colmatage par sédimentation; (e) les remontées de sol dans le tubage; (f) le retard dans le temps de réponse; etc...

Pratiquement, on peut réduire le nombre de résultats douteux en contrôlant rigoureusement les opérations de forage et en limitant la colonne d'eau appliquée. Il est par contre plus difficile de contrôler les fuites d'eau.

Par ailleurs, un examen de la théorie de l'essai PNV nous a conduits à détecter dans cet essai un autre risque d'erreur: il s'agit de l'erreur sur le niveau piézométrique (NP) estimé.

EXAMEN THÉORIQUE

Niveau piézométrique (NP)

Son estimation est rarement facile en cours de forage. En mesurant le niveau d'eau dans le tubage au début de chaque journée de forage, on n'est jamais certain de mesurer le NP parce qu'un tubage est rarement scellé dans le mort-terrain. Une bonne pratique est d'installer un piézomètre, une fois le forage terminé, et d'utiliser l'unique niveau obtenu comme NP pour les divers essais de perméabilité. Si le forage est réalisé en rivière, sur glace ou à partir d'une embarcation, le NP utilisé est souvent celui de la rivière.

Les pratiques décrites ci-dessus peuvent amener des erreurs importantes. En effet, un piézomètre ne donne que le NP existant au niveau précis où il a été installé, si son installation est correcte, alors que le niveau de la rivière ne donne que le NP existant dans la rivière si l'écoulement est lent. Or, il existe dans le sol des nappes d'eau sous pression artésienne, et des écoulements préférentiels dans les alluvions formant le lit d'une rivière. Les NP à diverses profondeurs peuvent donc différer notablement de l'unique NP disponible ou du niveau de la rivière. On commet donc fréquemment des erreurs en utilisant le NP ainsi estimé pour calculer la perméabilité à diverses profondeurs dans un même forage.

Théorie des essais à niveau variable

L'équation conventionnelle des essais PNV est:

$$\ln (H_1/H_2) = -k.C.(t_1-t_2) \quad (1)$$

où H_1 = différence de charge hydraulique (colonne d'eau) au temps t_1 ;
 k = coefficient de perméabilité;
 C = constante de forme de la cavité d'injection.

Cette équation est généralement utilisée parce qu'elle est pratique: il semble facile de mesurer la colonne d'eau H au temps t . Sa formulation résulte d'une opération mathématique d'intégration de la loi de Darcy:

$$Q = k.c.H \quad (2)$$

qui relie le débit écoulé Q , la perméabilité du sol, la colonne d'eau et une (autre) constante c de forme de la cavité. L'équation (2) paraît nettement moins pratique que (1). Son utilisation nécessite le calcul du débit injecté, égal au produit de la section intérieure S du tubage par la vitesse de descente de l'eau:

$$Q = -S \cdot \Delta H / \Delta t \quad (3)$$

En combinant (2) et (3), on obtient:

$$\Delta H / \Delta t = -k.c.H/S \quad (4)$$

En fait, l'utilisation de (2) ou (4) ne nécessitera qu'un simple calcul de la vitesse $\Delta H / \Delta t$ de descente de l'eau dans le tubage. On constate que (4) est la forme dérivée de (1), et en examinant (1), (2) et (4), on remarque aussi que, si une erreur est commise dans l'estimation du NP, et donc de la colonne d'eau H , cette erreur sera du type systématique dans (2) ou (4), parce qu'incluse dans des fonctions linéaires, alors qu'elle sera évolutive dans (1) parce qu'incluse dans la fonction logarithme.

L'équation (1) qui est la plus fréquemment utilisée, peut donc dissimuler une erreur évolutive. L'équation (4) peut dissimuler la même erreur, mais celle-ci étant systématique, il est possible de la détecter. C'est par la détection et l'élimination de cette erreur que la méthode ici présentée se distingue des méthodes d'interprétation généralement utilisées.

LA MÉTHODE DE CORRECTION

Le diagramme des vitesses $\Delta H / \Delta t$ est tracé en fonction des colonnes d'eau moyennes H pendant les intervalles Δt . Si l'écoulement est stable, les points expérimentaux doivent s'aligner sur une droite, dont la pente permet de calculer la perméabilité. D'après (4), la vitesse $\Delta H / \Delta t$ est nulle quand la colonne d'eau est nulle. La droite obtenue par le diagramme des vitesses doit donc couper l'axe H au point de colonne d'eau nulle. Si l'ordonnée de ce point expérimental est H_0 , alors H_0 est l'erreur systématique commise lors de l'évaluation du NP.

Les avantages du diagramme des vitesses paraissent évidents: il indique systématiquement si l'écoulement est stable, normal, c'est-à-dire s'il suit la loi de Darcy, permettant aussi d'éliminer l'erreur H_0 sur le NP estimé.

En résumé, les méthodes existantes ne tiennent pas compte du risque d'une erreur sur le NP estimé, qu'il soit déterminé visuellement ou à l'aide d'un piézomètre.

La Figure 1 illustre bien les différences entre la méthode conventionnelle et la méthode propo-

sée pour le même cas réel. Sur le graphique B, la colonne d'eau rectifiée H_r est obtenue par différence entre la colonne d'eau estimée H et l'erreur H_0 sur le NP estimé.

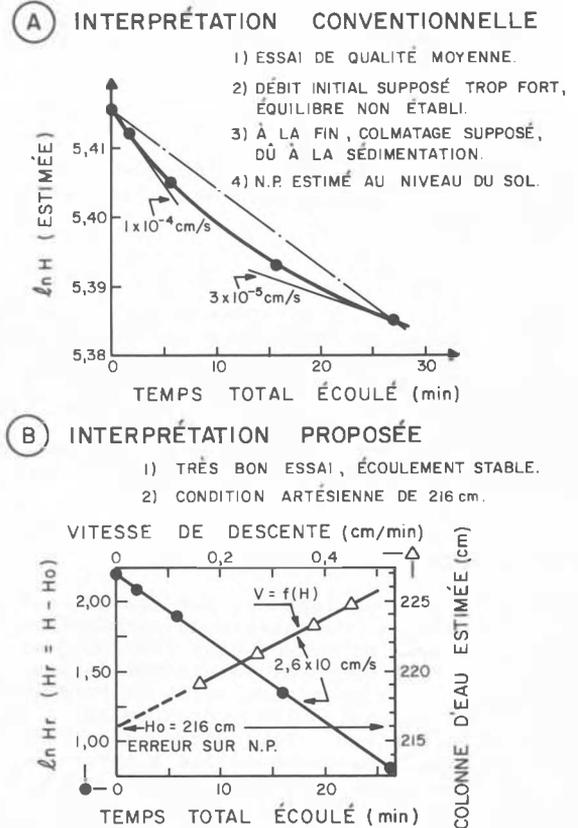


Fig. 1 Différences d'interprétation, pour un cas réel. La condition artésienne a été vérifiée par un piézomètre installé ultérieurement.

CONDITIONS GÉNÉRALES D'EXÉCUTION ET D'UTILISATION DES ESSAIS

Réalisation des essais

Les principes suivants doivent être respectés pour la réalisation d'un essai de perméabilité, au-dessous du NP local, à partir d'un forage.

- En règle générale, on ne doit effectuer un essai de perméabilité que lorsque le tubage progresse par battage.
- Tous les tubages peuvent être utilisés, mais ceux de fort ou petit calibre peuvent présenter des difficultés de battage ou de lavage.
- Le sabot de battage doit avoir le même diamètre extérieur que le tubage.
- On doit utiliser les plus longues sections de tubage disponibles afin de diminuer le nombre de joints. Le bon état de chaque section, des filets et des sièges, doit être vérifié.
- Il faut prendre des dispositions pour assurer l'étanchéité des joints.
- L'intérieur du tubage doit être nettoyé avec une pompe à grand débit et à faible pression. Les jets d'eau sortant de l'outil de lavage

doivent être dirigés vers l'horizontale ou vers le haut, jamais vers le bas. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau de retour ne contienne plus de sédiments en suspension. Le lavage terminé, l'outil est retiré lentement pendant que l'on maintient le tubage plein d'eau.

- L'eau utilisée pour le lavage, et subséquentement pour l'essai, doit être propre et, si nécessaire, un bassin de sédimentation doit être installé sur le circuit d'alimentation.
- A la suite du lavage, si le niveau d'eau dans le tubage descend et se stabilise rapidement, on choisit d'effectuer un essai à niveau constant. Sinon, l'essai PNV est effectué. Si la vitesse initiale est de l'ordre de 1 cm/min, on doit augmenter la colonne d'eau initiale pour améliorer la précision des mesures.

Minimum et maximum de la colonne d'eau

La règle de la colonne d'eau minimum est dictée par la précision des mesures. Celle de la colonne d'eau maximum est dictée par la stabilité de l'écoulement: en effet, une colonne d'eau trop importante peut provoquer un claquage hydraulique.

En pratique, la colonne d'eau minimum doit être de 1 m, la précision des mesures étant usuellement de 0,5 cm. Si la vitesse initiale de descente reste faible, de l'ordre de 1 cm/min, même après modification de la colonne d'eau, on doit mesurer les variations de niveau au millimètre près pour conserver la même précision.

En ce qui concerne la colonne d'eau maximum, la règle suivante a été suggérée pour le chantier, à titre sécuritaire:

$$H_{max} = H'/6 + H''/3 \quad (5)$$

où H' est l'épaisseur de la couche "immergée" et H'' l'épaisseur de la couche de sol au-dessus du NP. L'équation ci-dessus est en fait une traduction simple, d'utilisation facile sur un chantier, de la formule: $H_{max} = \sigma'_v / 6\gamma_w$ quand on suppose que $\gamma_{sat} = \gamma_h = 2,0 \gamma_w$.

Si on admet par ailleurs que le claquage se produit lorsqu'on applique une colonne d'eau dont la pression annule σ'_h , soit une colonne initiale $H_i = \sigma'_h / \gamma_w$, on obtient:

$$\frac{H_i}{H_{max}} = \frac{\sigma'_h / \gamma_w}{\sigma'_v / 6\gamma_w} = 6 \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 6 K_o \quad (6)$$

où K_o est le coefficient des terres au repos.

En supposant que la formule de Jaky ($K_o = 1 - \sin \phi$) s'applique aux sols granulaires, on peut déduire que le coefficient de sécurité fourni par (5) varie de 3,0 à 1,8 quand ϕ varie de 30 à 45°. On peut estimer que ce F.S. est relativement élevé, mais on ne doit pas oublier que les valeurs ci-dessus s'obtiennent avec deux hypothèses: celle de $\gamma_{sat} = 2,0 \gamma_w$ et celle du NP correctement estimé.

Utilisation des résultats des essais

En interprétant les résultats d'un essai de per-

méabilité, il faut conserver à l'esprit qu'un tel essai ne doit jamais être considéré individuellement, mais toujours comme une partie seulement d'une étude hydrogéologique. A ce titre, la méthode du diagramme des vitesses présente un net avantage sur la méthode conventionnelle puisqu'elle permet la détermination des NP à chaque profondeur d'essai. Et la connaissance de ces NP permet, avec l'aide des coefficients k et des stratigraphies, de reconstituer le mode d'écoulement des eaux souterraines dans le terrain naturel.

LES ÉCOULEMENTS TYPIQUES

Les diagrammes de vitesses les plus fréquemment obtenus par les essais PNV sont présentés ci-dessous.

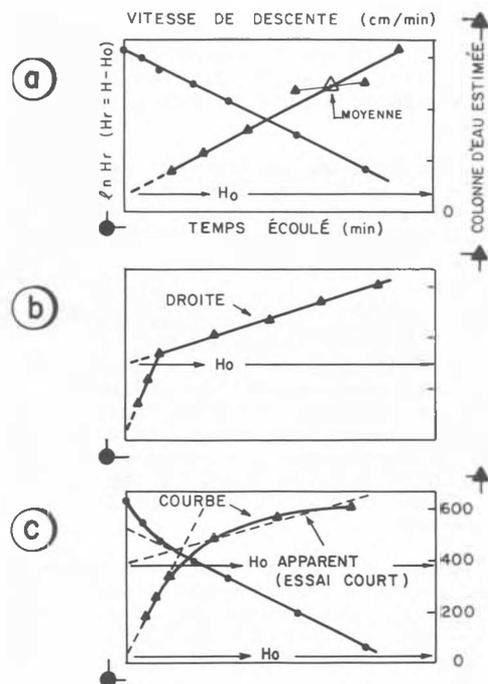


Fig. 2 Ecoulements typiques enregistrés par les diagrammes de vitesses: a) Essai de bonne qualité; b) Cas de fuite; c) Cas de claquage hydraulique.

La Figure 2a illustre un bon essai avec une erreur sur la troisième mesure. Cette erreur peut facilement être détectée car si l'on calcule la vitesse moyenne entre la 2^e et la 4^e mesure (i.e. en éliminant la 3^e), celle-ci fournit un point aligné avec les autres.

La Figure 2b est typique des sols soumis à des pressions artésiennes. Le diagramme des vitesses est rectiligne au début de l'essai. Puis, lorsque la colonne d'eau devient faible, apparaît un autre écoulement parasite. Ce dernier écoulement correspond, selon nous, à un débit de fuite, qui ne devient détectable et prépondérant que lorsque le niveau d'eau dans le tubage se rapproche du NP.

La Figure 2c correspond à un claquage hydraulique

du sol. Au début de l'essai, la perméabilité apparente est très élevée et la courbe des vitesses s'incurve pour finir de manière rectiligne avec un coefficient k nettement plus faible qu'initialement. Cette courbe est analogue aux courbes enregistrées lors des claquages hydrauliques provoqués dans une argile.

Le phénomène de claquage hydraulique peut apparaître sur un graphique conventionnel $\ln H$ vs t , comme sur la Figure 2c. Il peut aussi ne pas apparaître du tout, le graphique en logarithme donnant une droite, contrairement au graphique des vitesses qui indique un claquage.

Par ailleurs, le phénomène de claquage peut être dissimulé sur le graphique des vitesses d'un essai de durée insuffisante. En effet, on n'enregistre alors que la première partie du graphique et on pourrait conclure par exemple à une erreur de 3,8 m sur le NP. Cependant, l'amplitude de cette erreur, sur un NP estimé à 5,0 m de profondeur, doit susciter un doute chez celui qui effectue l'interprétation de l'essai et doit l'amener à vérifier la condition de claquage en supposant que le NP estimé était correct.

En cas de claquage, le coefficient de perméabilité est mesuré en fin d'essai, sur la partie rectiligne du graphique: il est considéré douteux car mesuré après claquage du sol.

COMPARAISON DES NP ET ERREURS D'ESTIMATION

Les différents NP obtenus par les essais PNV ont pu être comparés aux NP des piézomètres installés dans certains trous de forage. A l'exception de rares désaccords, la comparaison s'est révélée excellente, dans des conditions hydrogéologiques très variées, le cas de la nappe hydrostatique n'ayant été rencontré qu'à de rares occasions.

Avec l'assurance de cet accord, près de trois cents essais antérieurs et postérieurs à l'introduction de la méthode ont été analysés de façon statistique pour évaluer le type d'erreur commise sur le NP estimé en cours de forage.

Les Figures 3 et 4 présentent deux courbes cumulatives: l'erreur H_0 en cm et l'erreur commise sur la colonne d'eau réelle initiale (rapport H_0/H_{ri} où $H_{ri} = H_i - H_0$).

La similitude des résultats obtenus avec les essais antérieurs ou postérieurs est remarquable. Elle montre que cette erreur est du type erreur humaine, difficilement réductible, car elle provient d'une appréciation visuelle dans un délai limité (en cours de forage), à l'aide d'un instrument inadéquat, un tubage n'ayant jamais constitué un piézomètre.

LES CAS DE CLAQUAGE HYDRAULIQUE

Dans l'étude statistique du phénomène de claquage hydraulique, les sols granulaires ont été classés en trois catégories:

- ceux pour lesquels l'indice de pénétration standard N est compris entre 4 et 14 (G-4-14);

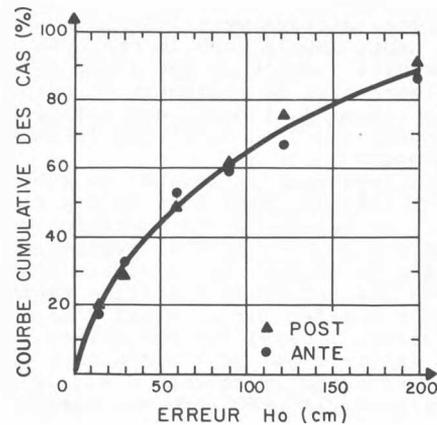


Fig. 3 Courbe cumulative de l'erreur H_0 sur le niveau piézométrique.

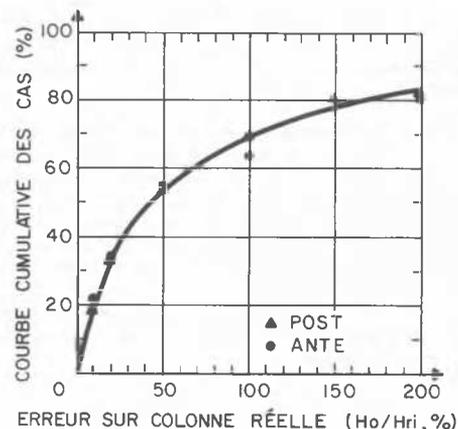


Fig. 4 Courbe cumulative de l'erreur commise sur la colonne d'eau réelle initiale.

- ceux pour lesquels $15 \leq N \leq 25$ (G-15-25);
- les tills avec $N > 50$ (T-2,28 et T-2,40).

La valeur de H_{max} a été calculée directement par $\sigma'_{v}/6\gamma_w$ de façon à obtenir un rapport H_{ri}/H_{max} égal à 6 K_0 lors du claquage, conformément à l'Eq. 6.

Pour le calcul de σ'_{v} , l'hypothèse $\gamma_{sat} = \gamma_h = 2,0 \gamma_w$ a été conservée dans le cas des sols vérifiant $N \leq 25$ et deux hypothèses ont été considérées dans le cas du till glaciaire, soit $\gamma_h = \gamma_{sat} = 2,28 \gamma_w$ ou $2,40 \gamma_w$. Dans le cas de dépôts argileux, recouvrant les sols granulaires, les poids volumiques adoptés proviennent des essais de laboratoire.

La Figure 5 regroupe tous les essais ayant provoqué un claquage hydraulique net (CH) d'après leurs courbes des vitesses, ceux pour lesquels on suppose qu'un tel claquage s'est produit (douteux), ainsi que ceux pour lesquels un écoulement régulier a été enregistré alors que le rapport H_{ri}/H_{max} était passablement élevé (pas de CH).

Nous avons choisi cette présentation pour son

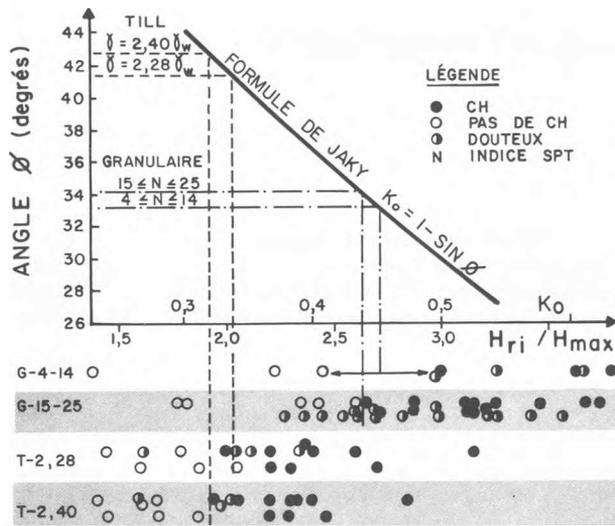


Fig. 5 Regroupement des essais ayant provoqué un claquage hydraulique (CH) pour déterminer le coefficient K_o et l'angle ϕ par la formule de Jaky.

intérêt particulier au lieu de chercher à utiliser le point où le diagramme des vitesses redevient linéaire, comme dans le cas des claquages hydrauliques provoqués dans l'argile.

Notre classification fait apparaître des limites entre les essais ayant produit un claquage hydraulique et les autres. Ces limites fournissent des angles ϕ de frottement de l'ordre de grandeur des valeurs usuelles de conception, ce qui confirme le bien-fondé de la méthode d'interprétation des essais PNV.

CONNAISSANCE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Suite à la détermination de différents NP par les diagrammes des vitesses des essais PNV d'un même forage, il est possible de reconstituer le mode d'écoulement des eaux souterraines, en s'appuyant sur la connaissance de la stratigraphie des sols. Un cas particulièrement intéressant est présenté ici pour illustrer cet avantage.

Deux forages ont été effectués de part et d'autre d'un ruisseau qui décharge un lac.

Dans le premier, à proximité du ruisseau, les essais PNV ont permis d'enregistrer une surpression artésienne qui augmente avec la profondeur pour atteindre un maximum de 2,65 m dans une couche de sable et gravier avec traces de silt, située sous 0,3 m d'argile.

Dans le second, en flanc de colline sur l'autre rive du ruisseau, les essais PNV ont mis en évidence une hydrogéologie complexe qui peut être décrite de la manière suivante:

- (i) Les 4 m supérieurs de sable graveleux sont perméables et aucune nappe de surface n'a été rencontrée.
- (ii) Le sable sous-jacent contient de fines bandes de silt qui créent des réservoirs

perchés dans la pente du massif.

- (iii) Entre 30 m et 34 m de profondeur, les perméabilités sont élevées (10^{-2} cm/s) dans une couche de sable qui constitue un réservoir profond, dont le niveau se situe à 3 m environ au-dessus du ruisseau. Ce réservoir est confiné entre deux couches de 2 m d'épaisseur, formées de silt ayant 10 à 50% de particules inférieures à 2μ . Le NP de ce dernier réservoir profond correspond exactement au niveau artésien maximum enregistré dans le premier forage, sur la rive opposée du ruisseau.

Les piézomètres installés dans les trous de forages ont donné des niveaux égaux à ceux fournis par les essais PNV effectués aux profondeurs voisines de celles d'installation. Ils ont ainsi confirmé les résultats des essais PNV, mais ils n'auraient jamais pu permettre la reconstitution des conditions hydrogéologiques du site (Figure 6) comme ont pu le faire les séries d'essais PNV.

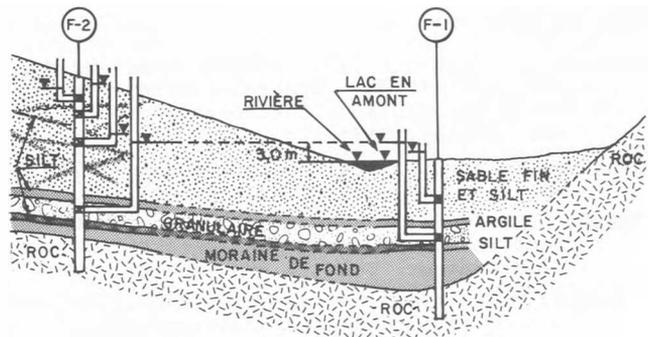


Fig. 6 Reconstitution des conditions hydrogéologiques d'un site.

CONCLUSION

La méthode proposée par le présent article présente deux avantages sur la méthode conventionnelle: elle permet d'éliminer l'erreur commise lors de l'estimation du NP en cours de forage, et elle permet d'apprécier la stabilité de l'écoulement ainsi que le phénomène de claquage hydraulique.

Les NP obtenus directement par la méthode proposée, au niveau de chaque essai PNV, se sont révélés en excellent accord avec les niveaux déterminés par des piézomètres. Cet accord est d'autant plus probant que le cas de la nappe simple, hydrostatique, n'a été rencontré qu'à de rares occasions.

Les essais analysés ont permis d'établir que l'erreur d'estimation du NP local pendant le forage était demeurée inchangée au cours des années. Ce résultat illustre parfaitement le caractère humain de ce type d'erreur, le niveau estimé par l'inspecteur de forage étant généralement plus bas que le niveau réel.

Une analyse statistique du phénomène de claquage hydraulique dans les sols granulaires (till et sable de densité moyenne) a permis d'obtenir, a-

vec l'aide de la formule de Jaky, des angles ϕ de frottement de l'ordre de grandeur des valeurs usuelles de conception.

Suite à la détermination de différents NP par les essais PNV d'un même forage, il est possible de reconstituer le mode d'écoulement des eaux souterraines, et un cas intéressant a été présenté afin d'illustrer cet avantage.

En résumé, la méthode proposée permet de préciser la valeur d'un essai PNV avec un bon niveau de confiance, par l'élimination d'une erreur fréquente, ainsi que par une exploitation plus rationnelle des résultats.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants à la Société d'Energie de la Baie James pour l'autorisation de publier les résultats.

RÉFÉRENCES

- BJERRUM L., NASH J.K.T.L., KENNARD R.M. and GIBSON R.E. (1972). Hydraulic fracturing in field permeability testing. *Géotechnique*, Vol. 22, pp. 319-332.
- Canadian Foundation Engineering Manual (1978) by the Canadian Geotechnical Society.
- GIBSON R.E. (1966). A note on the constant head test to measure soil permeability in situ. *Géotechnique*, Vol. 16, pp. 256-257.
- HORVSLEV M.J. (1951). Time-lag and soil permeability in ground water observations. Bulletin 36, U.S. Army Eng. Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.
- MILLIGAN V. (1975). Field measurement of permeability in soil and rock. ASCE Proc. of the Conf. on in situ measurement of soil properties, Raleigh, North-Carolina, Vol. II, pp. 3-36.
- RAT M., LAVIRON F. et JOREZ J.C. (1970). Essai Lefranc. Bull. de Liaison des Lab. Rout., No Spécial N, pp. 56-66.
- WEBER W.G. (1968). In situ permeabilities for determining rates of consolidation. High Res. Rec. 243, pp. 49-61.